

CARLO ROVELLI

PAR-DELÀ
LE VISIBLE

LA RÉALITÉ DU MONDE PHYSIQUE
ET LA GRAVITÉ QUANTIQUE



VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

CARLO ROVELLI

PAR-DELÀ
LE VISIBLE

LA RÉALITÉ DU MONDE PHYSIQUE
ET LA GRAVITÉ QUANTIQUE

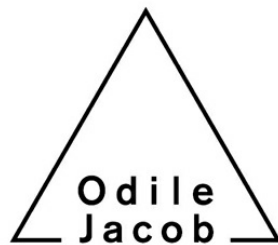


Carlo Rovelli

Par-delà le visible

La réalité du monde physique
et la gravité quantique

*Traduit de l'italien par
Patrick Vighetti*



Titre original :
La realtà non è come ci appare. La struttura elementare delle cose

© 2014, Raffaello Cortina Editore

Pour la traduction française :

© ODILE JACOB, JANVIER 2015
15, RUE SOUFFLOT, 75005 PARIS

www.odilejacob.fr

ISBN : 978-2-7381-6791-0

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5 et 3 a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Ce document numérique a été réalisé par [Nord Compo](#).

Préambule

En marchant au bord de la mer

Nous sommes obsédés par nous-mêmes. Nous étudions *notre* histoire, *notre* psychologie, *notre* philosophie, *notre* littérature, *nos* dieux. Une grande partie de notre savoir porte sur l'homme même, comme si nous étions le centre de l'Univers. Je crois que, si j'aime la physique, c'est justement parce qu'elle ouvre la fenêtre et qu'elle regarde au loin. Elle me donne une sensation d'air frais entrant dans la maison.

Ce que nous voyons au-delà de la fenêtre ne cesse de nous étonner. Nous avons énormément appris sur l'Univers. Au cours des siècles, nous avons reconnu beaucoup de nos erreurs. Nous croyions que la Terre était plate, qu'elle était immobile au centre du monde, que l'Univers était petit et qu'il ne changeait pas, que les hommes formaient une espèce à part, sans parenté avec les autres animaux. Nous avons appris qu'il existe des quarks, des trous noirs, des particules de lumière, des ondes d'espace et d'extraordinaires architectures moléculaires dans chaque cellule de notre corps. L'humanité est comme un enfant qui grandit et qui découvre avec stupeur que le monde ne s'arrête pas à sa petite chambre et à son espace de jeu, mais qu'il est vaste, qu'il y a mille choses à découvrir et des idées à connaître différentes de celles

qui lui sont familières. L'Univers est multiforme et illimité, et nous continuons à en découvrir de nouveaux aspects. Plus nous en apprenons sur le monde, plus nous nous étonnons de sa variété, de sa beauté et de sa simplicité.

Mais plus nous découvrons, plus nous nous rendons compte aussi que ce que nous ne savons pas encore est plus vaste que ce que nous avons déjà compris. Plus nos télescopes sont puissants et plus nous voyons des cieux inconnus et inattendus. Plus nous regardons les détails infimes de la matière, plus nous découvrons de structures nouvelles. Aujourd'hui, nous voyons presque jusqu'au Big Bang, la grande explosion dont, il y a quatorze milliards d'années, sont issues toutes les galaxies du ciel ; mais déjà nous commençons à entrevoir quelque chose au-delà du Big Bang. Nous avons appris que l'espace se courbe, et déjà nous commençons à entrevoir que ce même espace est tissé de grains quantiques qui vibrent.

Ce que nous savons sur la grammaire élémentaire du monde continue à croître. Si nous essayons de rassembler tout ce que nous avons appris sur le monde physique au cours du xx^e siècle, nous entrevoyons quelque chose de profondément différent des notions de matière et d'énergie, d'espace et de temps qu'on nous a enseignées à l'école. Il en émerge une structure élémentaire du monde où n'existent ni le temps ni l'espace, mais où pullulent les événements quantiques. Des champs quantiques dessinent l'espace, le temps, la matière et la lumière, en échangeant des informations d'un événement à l'autre. La réalité est un réseau d'événements granulaires ; la dynamique qui les relie est probabiliste ; entre un événement et un autre, l'espace, le temps, la matière et l'énergie sont dissous en une nuée de probabilités.

Ce monde nouveau et étrange émerge aujourd'hui peu à peu de l'étude du principal problème ouvert dans la physique fondamentale : la *gravité quantique*. Ce problème consiste à rendre cohérent ce que

nous avons compris du monde à travers les deux grandes découvertes de la physique du xx^e siècle : la relativité générale et la théorie des quanta. C'est à la *gravité quantique* et au monde étrange que cette recherche commence à nous entrouvrir que ce livre est consacré.

Il relate la recherche en cours : ce que nous sommes en train d'apprendre, ce que nous savons et ce qu'il nous semble aujourd'hui commencer à comprendre de la nature élémentaire des choses. Il part des origines, lointaines, de plusieurs idées clés qui nous permettent de mettre aujourd'hui de l'ordre dans nos conceptions du monde. Il décrit les deux grandes découvertes du xx^e siècle, la théorie de la relativité générale d'Einstein et la mécanique quantique, en cherchant à cerner leur contenu physique. Il dessine l'image du monde qui émerge aujourd'hui de la recherche en gravité quantique, en tenant compte des dernières indications expérimentales, comme les confirmations du modèle cosmologique standard obtenues grâce au satellite *Planck* (2013) et la non-observation des particules supersymétriques, que beaucoup attendaient, au Cern, en 2013. Il discute des conséquences de ces idées : la structure granulaire de l'espace, la disparition du temps à très petite échelle, la physique du Big Bang, l'origine de la chaleur des trous noirs, jusqu'au rôle que pourrait jouer l'information à la base de la physique.

Dans le célèbre mythe que Platon rapporte au Livre VII de *La République*, des hommes sont enchaînés au fond d'une sombre caverne, où ils ne voient que des ombres, projetées par un feu sur la paroi à laquelle ils font face. Ils croient qu'il s'agit là de la réalité. L'un d'eux se libère, sort et découvre la lumière du soleil et le vaste monde. Au début, l'éclat du jour l'éblouit et l'égare : ses yeux n'y sont pas habitués. Il parvient enfin à regarder et retourne heureux vers ses compagnons pour leur dire ce qu'il a vu. Ceux-ci ont du mal à le croire. Nous sommes tous au fond d'une caverne, attachés à la chaîne de notre

ignorance et de nos préjugés, et nos faibles sens ne nous montrent que des ombres. Essayer de voir plus loin nous égare souvent : nous n'y sommes pas habitués. Pourtant, nous essayons. C'est cela, la science. La pensée scientifique explore et redessine le monde, elle nous en donne des images peu à peu meilleures : elle nous apprend à le penser plus efficacement. La science est une exploration continue de formes de pensée. Sa force, c'est sa capacité visionnaire de ruiner des idées préconçues, de révéler de nouveaux territoires du réel et d'élaborer de nouvelles images du monde, plus efficaces. Cette aventure repose sur toute la connaissance accumulée, mais ce qui l'anime, c'est le changement. Regarder plus loin. Le monde est infini et sublime ; nous voulons aller le voir. Nous sommes immergés dans son mystère et dans sa beauté, et derrière la colline qui bouche notre horizon, il y a des territoires encore inexplorés. L'incertitude dans laquelle nous sommes plongés, notre précarité, le fait d'être suspendus au-dessus de l'abîme de l'immensité de ce que nous ne savons pas, ne rend pas notre vie insensée : cela en fait tout le prix.

J'ai écrit ce livre pour raconter ce qui est pour moi le merveilleux de cette aventure. Je l'ai écrit en pensant à un lecteur qui ne connaîtrait rien à la physique, mais qui serait curieux de savoir ce que nous comprenons et ne comprenons pas aujourd'hui de la trame élémentaire du monde, et ce que nous sommes en train de chercher. Et pour tenter de communiquer la merveilleuse beauté du panorama sur la réalité visible que donne cette perspective.

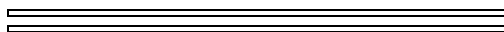
Je l'ai écrit aussi en pensant aux collègues, compagnons de voyage répandus à travers le monde, ou aux jeunes passionnés de science qui voudraient s'engager dans cette voie. J'ai essayé d'esquisser le panorama général de la structure du monde physique, sous le double éclairage de la relativité et des quanta, puisque je les crois conciliables. Il ne s'agit pas seulement d'un livre de vulgarisation ; c'est aussi un

livre pour articuler un point de vue cohérent, dans un domaine de recherche où le caractère abstrait et technique du langage risque de brouiller la vision d'ensemble. La science est faite d'expériences, d'hypothèses, d'équations, de calculs et de longues discussions, mais il ne s'agit là que d'instruments, tels ceux des musiciens. Ce qui compte dans la musique, c'est la musique, et ce qui compte dans la science, c'est la compréhension du monde qu'elle parvient à nous offrir. Pour comprendre le sens de la découverte que la Terre tourne autour du Soleil, il est inutile de s'engager dans les calculs compliqués de Copernic ; pour comprendre l'importance de la découverte du fait que tous les êtres vivants de notre planète ont les mêmes ancêtres, nul n'est besoin de suivre les argumentations complexes du livre de Darwin. La science consiste à lire le monde d'un point de vue de plus en plus large.

Dans ce livre, je décris l'état actuel de la recherche de cette nouvelle image du monde, tel que je le comprends aujourd'hui, en essayant de cerner les nœuds essentiels et les nœuds logiques. Comme si, en marchant au bord de la mer durant une longue nuit d'été, on le racontait à un collègue et ami qui vous demanderait : « Mais toi, comment penses-tu que sont vraiment les choses ? »

PREMIÈRE PARTIE

RACINES



Ce livre commence à Milet, il y a vingt-six siècles. Pourquoi ouvrir un livre sur la gravité quantique en parlant de faits, de personnes et d'idées aussi anciennes ? Que le lecteur pressé d'en venir aux quantités d'espace ne m'en veuille pas, mais il est plus facile de comprendre les idées en partant des racines qui les ont fait naître, et une part importante des idées qui se sont montrées plus tard efficaces pour comprendre le monde remonte à il y a plus de vingt siècles. Si nous retraçons brièvement leur naissance, nous les comprendrons mieux, et les étapes suivantes de l'histoire deviendront plus simples et plus naturelles.

Mais il y a plus. Certains problèmes posés à cette époque sont toujours déterminants pour la compréhension du monde. Certaines des idées les plus récentes sur la structure de l'espace renvoient à des concepts et à des questions introduits à l'époque. En parlant de ces idées, je mets tout de suite sur le tapis plusieurs questions fondamentales qui seront déterminantes pour comprendre les bases de la gravité quantique. Cela permettra de distinguer ces idées qui remontent à l'origine de la pensée scientifique, même si souvent elle ne nous est pas familière, de celles qui sont au contraire ses aspects les plus radicalement nouveaux. Le lien entre les problèmes posés par la pensée de certains savants de l'Antiquité et les solutions trouvées par Einstein et par la gravité quantique est, nous le verrons, très étroit.

CHAPITRE 1

Grains

Selon la tradition, en 450 avant notre ère, un homme s'embarqua pour un voyage entre Milet et Abdère ([figure 1.1](#)). Un voyage fondamental pour l'histoire de la connaissance.

Cet homme fuyait très probablement des bouleversements politiques à Milet, où était en cours une violente reprise du pouvoir par une partie de l'aristocratie. Milet avait été une cité grecque riche et florissante, peut-être la principale cité du monde grec avant le siècle d'or d'Athènes et de Sparte. Elle avait été un centre de commerce fort actif et elle dominait un réseau de près d'une centaine de colonies et de comptoirs commerciaux qui s'étendait de la mer Noire à l'Égypte. À Milet circulaient les idées, arrivaient des caravanes de Mésopotamie et des navires provenant de tous les ports de la Méditerranée.

Le siècle précédent avait vu s'accomplir à Milet une révolution intellectuelle fondamentale pour l'humanité. Un groupe de penseurs avait renouvelé la façon de poser des questions sur le monde et de chercher des réponses. Le plus grand d'entre eux avait été Anaximandre.

Depuis toujours, du moins depuis que l'humanité a laissé des traces écrites qui sont parvenues jusqu'à nous, les hommes se sont demandé

comment le monde s'est formé, de quoi il est fait, comment il est ordonné, pourquoi se produisent les phénomènes naturels. Depuis des milliers d'années, ils avaient donné des réponses qui se ressemblaient toutes : elles faisaient référence à des histoires compliquées d'esprits, de dieux, d'animaux imaginaires et mythologiques, et d'autres choses de ce genre. Des tablettes de caractères cunéiformes aux anciens textes chinois, des écrits en hiéroglyphes aux mythes sioux, des plus anciens textes indiens à la Bible, des histoires africaines à celles des Aborigènes australiens, c'est tout un flot coloré – mais au fond assez ennuyeux – de serpents à plumes ou de vaches sacrées, de dieux irascibles, querelleurs ou aimables, qui créent le monde en soufflant sur les abysses, en disant « *Fiat lux* » ou en sortant d'un œuf en pierre.



Figure 1.1. Le voyage de Leucippe de Milet, fondateur de l'école atomiste (vers 450 av. J.-C.).

Puis, à Milet, au début du ^{vi}^e siècle avant notre ère, Thalès, son disciple Anaximandre, Hécatee et leur école découvrent une autre manière de chercher des réponses. Une méthode qui ne se réfère pas aux mythes, aux esprits et aux dieux, mais qui cherche des réponses dans la nature même des choses. Cette immense révolution de la pensée inaugure une nouvelle modalité de la connaissance et signe la première aurore de l'esprit scientifique.

Les Milésiens comprennent qu'en utilisant de manière avisée l'observation et la raison, en évitant de chercher dans l'imagination, dans les mythes anciens ou dans la religion les réponses à ce que nous ne savons pas, et surtout en utilisant prudemment la pensée critique, nous pouvons rectifier peu à peu notre point de vue sur le monde, découvrir des aspects de la réalité qui restent invisibles au regard ordinaire et apprendre de nouvelles choses.

La découverte sans doute décisive est celle d'un style de pensée nouveau, où l'élève n'est plus obligé de respecter et de partager les idées du maître, mais où il peut bâtir sur ces idées sans hésiter à s'en écarter et à en critiquer certains aspects. Cette troisième voie, en équilibre entre l'adhésion et l'opposition à une école, est la clé de voûte qui permet l'immense développement de la pensée philosophique et scientifique qui va suivre : à partir de là, la connaissance commence à croître de façon vertigineuse, en se nourrissant du savoir du passé mais aussi, en même temps, de la possibilité de critiquer, et donc d'améliorer, ce même savoir. *L'incipit* foudroyant du livre d'histoire d'Hécatee saisit l'essence de la pensée critique, y compris la conscience de sa propre faillibilité : « J'écris les choses dites ici selon qu'elles me

semblent vraies ; car les récits des Hellènes sont à mon avis aussi nombreux que ridicules. »

La légende raconte que Héraclès descend dans l'Hadès depuis le cap Tenaros : Hécatee visite le cap Tenaros, constate qu'il n'y a là aucune route souterraine, aucun accès à l'Hadès, et juge alors la légende fausse. C'est l'aube d'une ère nouvelle.

Les progrès de cette approche nouvelle de la connaissance sont rapides et impressionnants. En quelques années seulement, Anaximandre comprend que la Terre flotte dans le ciel et que le ciel baigne la Terre, que l'eau de pluie provient de l'évaporation de l'eau terrestre, que la diversité des substances du monde doit être comprise en termes d'un seul constituant unitaire et simple, qu'il baptise *ἀπείρων* (*apeiron*), l'indistinct, que les animaux et les plantes évoluent et s'adaptent aux modifications du milieu, que l'homme doit avoir évolué à partir d'autres animaux et, peu à peu, il jette les bases d'une grammaire de la compréhension du monde qui est encore la nôtre.

Située au point de rencontre entre la civilisation grecque naissante et les anciens empires de Mésopotamie et d'Égypte, nourrie du savoir de ces derniers, mais baignant dans la liberté et dans la fluidité politique typiquement grecques, dans un espace social dépourvu de palais impériaux et de puissantes castes sacerdotales, où les citoyens discutent sur l'agora de leur propre destin, Milet est le lieu où pour la première fois les hommes débattent collectivement de leurs propres lois, où se réunit le premier Parlement de l'histoire du monde – le Pannonium, sanctuaire de rencontre des délégués de la Ligue ionienne – et où, pour la première fois, les hommes mettent en doute l'idée que seuls les dieux peuvent expliquer les faits incompréhensibles du monde. Par la discussion, on peut obtenir les meilleures décisions pour la communauté ; par la discussion, on peut parvenir à comprendre le monde. Tel est l'immense héritage de Milet, berceau de

la philosophie, des sciences naturelles, des travaux géographiques et historiques. Il n'est pas exagéré d'affirmer que toute la tradition scientifique et philosophique méditerranéenne, occidentale, moderne enfin, a une racine cruciale dans la spéculation des penseurs de Milet du VI^e siècle¹.

Ce Milet lumineux connut peu après une fin terrible. L'arrivée de l'Empire perse et une révolte anti-impériale ratée conduisirent à une féroce destruction de la cité, en 494 avant notre ère, et à la réduction en esclavage d'un grand nombre de ses habitants. À Athènes, le poète Phrynique composa une tragédie, *La Prise de Milet*, qui émut profondément les Athéniens, au point qu'on interdit de la remettre en scène, car elle suscitait trop de souffrance. Mais, vingt ans plus tard, les Grecs repoussent la menace perse, Milet renaît, est repeuplé et redevient un centre de commerce et d'idées, et sa pensée et son esprit se diffusent de nouveau².

C'est cet esprit qui devait animer le personnage avec lequel nous avons ouvert le chapitre. Vers – 450, selon la tradition, l'homme embarqua de Milet pour Abdère. Son nom était Leucippe. On sait peu de chose sur sa vie. Il écrivit un livre intitulé *La Grande Cosmologie*. Arrivé à Abdère, il fonda une école scientifique et philosophique à laquelle il associa très vite un jeune disciple, dont l'influence va rejaillir sur la pensée de tous les temps : Démocrite ([figure 1.2](#)).

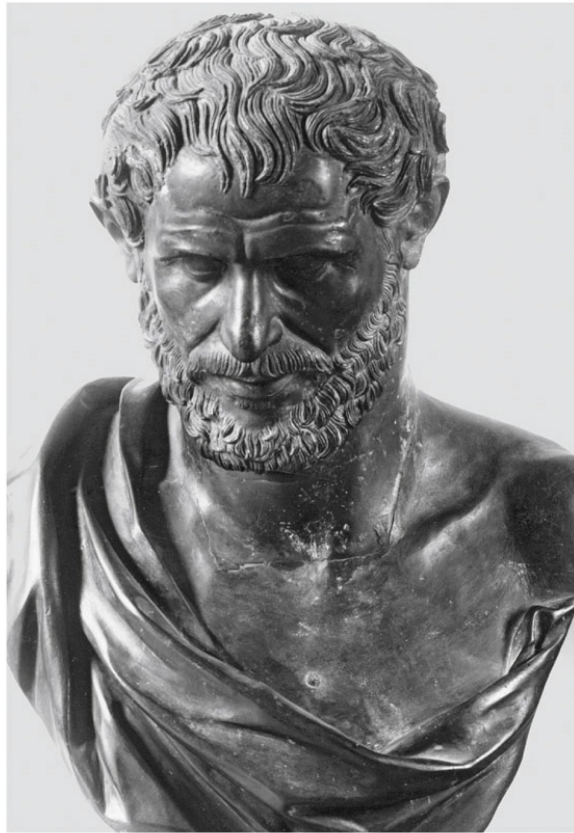


Figure 1.2. Démocrite d'Abdère.

La pensée des deux auteurs se confond. Leurs textes originaux sont perdus. Leucippe fut le maître. Démocrite fut son grand disciple : il écrivit des dizaines d'ouvrages couvrant tous les champs du savoir et fut respecté profondément dans l'Antiquité, où ses écrits étaient connus. Il fut considéré comme un des grands parmi les savants. « Le plus subtil de tous les Anciens », l'appelle Sénèque³. « Qui pouvons-nous comparer à lui non seulement pour sa grandeur d'esprit, mais aussi pour sa grandeur d'âme ? », se demande Cicéron⁴. Ce fut lui qui érigea l'immense cathédrale de l'atomisme antique.

Qu'avaient donc découvert Leucippe et Démocrite ? Les Milésiens avaient compris que le monde peut être pensé par la raison. Ils

s'étaient convaincus que la variété des phénomènes naturels pouvait être ramenée à quelque chose de simple et ils avaient essayé d'en déterminer la nature. Ils concevaient une espèce de substance élémentaire présente partout. Anaximène, parmi les Milésiens, imaginait que cette substance pouvait se comprimer et se raréfier et ainsi se transformer en l'un ou en l'autre des éléments constitutifs du monde. C'était un embryon de physique, élémentaire et grossier, mais qui allait dans la bonne direction. Il servait une idée, une grande idée, une grande vision, pour essayer de suggérer quel pouvait être l'ordre secret du monde. Leucippe et Démocrite la reprirent.

La grande idée du système de Démocrite est extrêmement simple : l'Univers entier est formé d'un espace vide infini, dans lequel circulent d'innombrables atomes. Il ne renferme rien d'autre. L'espace est illimité, il n'a ni haut ni bas, il n'a pas de centre, il n'a pas de bornes. Les atomes n'ont aucune qualité, si ce n'est leur forme. Ils n'ont pas de poids, de couleur, de saveur : « Opinion le sucré, opinion l'amer, opinion le chaud, opinion le froid, opinion la couleur : en réalité, seulement les atomes et le vide⁵. »

Les atomes sont indivisibles, ce sont les grains élémentaires de la réalité, qui ne peuvent pas être davantage subdivisés et dont tout est constitué. Ils se meuvent librement dans l'espace, se heurtent entre eux, s'agglomèrent, se repoussent ou s'attirent. Les atomes semblables s'attirent et s'agglomèrent.

Telle est la structure du monde. Telle est la réalité. Tout le reste n'est que le produit dérivé, fortuit et accidentel de ce mouvement et de cette combinaison d'atomes. De cette combinaison des atomes naît l'infinie variété de toutes les substances dont est fait le monde.

Quand les atomes s'agglomèrent, les seules choses qui comptent, les seules choses qui existent au niveau élémentaire sont leur forme, leur disposition dans la structure et la manière dont ils se combinent.

De même qu'en combinant la vingtaine de lettres de l'alphabet de diverses manières on peut obtenir des comédies, des tragédies, des histoires ridicules ou de grands poèmes épiques, de même, en combinant les atomes élémentaires, on obtient le monde dans son infinie variété. La métaphore est de Démocrite⁶.

Il n'y a aucune finalité, aucun dessein dans cette immense danse des atomes. Nous-mêmes, comme le reste de la nature, sommes un des innombrables résultats de cette danse infinie. Le produit d'une combinaison accidentelle. La nature continue à expérimenter des formes et des structures et, comme les animaux, nous sommes le produit d'une sélection fortuite et accidentelle, advenue durant de très longues périodes de temps. Notre vie est une combinaison d'atomes, notre pensée, nos rêves sont faits d'atomes subtils, nos espoirs et nos émotions sont écrits dans le langage de la combinaison des atomes. La lumière que nous voyons, ce sont des atomes qui nous apportent des images. D'atomes sont constituées les mers, les cités et les étoiles. C'est une vision immense, infinie, incroyablement simple et incroyablement puissante, sur laquelle se construira plus tard le savoir d'une civilisation.

À partir de là, Démocrite articule dans des dizaines d'ouvrages un vaste système où sont traitées des questions de physique, de philosophie, d'éthique, de politique, de cosmologie. Il écrit sur la nature du langage, sur la religion, la naissance des sociétés humaines et bien d'autres thèmes encore. (Le début de sa *Petite Cosmologie* est impressionnant : « Dans cet ouvrage, je traite de tout. ») Tous ces livres sont perdus. Nous ne connaissons sa pensée qu'à partir des références, des citations et des résumés d'autres auteurs anciens⁷. Il s'en dégage un humanisme profond, rationaliste et matérialiste⁸. Démocrite combine une très grande attention à la nature, éclairée par une limpide lumière naturelle et d'où toute trace de pensée mythique est chassée,

avec une grande attention à l'humanité et un profond sérieux dans la vision éthique de la vie, qui anticipe de deux mille ans les meilleures parties des Lumières du XVIII^e siècle. L'idéal éthique de Démocrite est celui de la tranquillité de l'âme, qu'on atteint par la modération et l'équilibre, en s'appuyant sur la raison, sans se laisser envahir par les passions.

Platon et Aristote ont très bien connu Démocrite et ont combattu ses idées. Ils l'ont fait au nom d'idées alternatives qui, plus tard, pendant des siècles, ont été des obstacles à l'accroissement du savoir. Tous deux ont rejeté avec force les explications naturalistes de Démocrite et ont tenté de comprendre le monde en termes finalistes, c'est-à-dire en pensant que tout ce qui advient obéit à une finalité – une façon de penser qui se révélera peu efficace pour comprendre la nature –, ou bien en termes de bien et de mal, confondant des questions humaines et des questions qui ne nous concernent pas.

Aristote évoque parfois des idées de Démocrite, avec beaucoup de respect. Platon ne le cite jamais, mais les spécialistes actuels y voient un choix, non un manque de connaissance. La critique des idées de Démocrite est implicite dans de nombreux ouvrages de Platon, par exemple dans sa critique des « physiciens ». Dans un passage du *Phédon*, Platon met dans la bouche de Socrate un reproche adressé à tous les physiciens : quand les physiciens lui ont expliqué que la Terre est ronde, il a réagi vivement, car il voulait savoir quel était le « bien » pour la Terre, en quoi le fait d'être ronde pouvait lui être bénéfique. Socrate raconte qu'il s'est d'abord enthousiasmé pour la physique, avant d'être déçu par elle :

Il m'expliquerait, en premier lieu, si la Terre est plate ou ronde, et, puisqu'il me l'expliquerait, il m'en exposerait tout au long la raison et la nécessité ; m'apprenant, lui qui dit ce

qui est le meilleur, qu'il était meilleur pour la Terre d'avoir telle ou telle forme ! Et, s'il me disait qu'elle est au centre du monde, il m'exposerait tout au long qu'il était meilleur pour elle d'être au centre⁹.

Comme il était à côté de la plaque, ici, le grand Platon !

Y a-t-il une limite à la divisibilité ?

Richard Feynman, le plus grand physicien de la seconde moitié du ^{xx}^e siècle, écrit au début de son splendide *Cours de physique* :

Si, lors d'un cataclysme, tout le savoir scientifique devait disparaître et qu'il n'était possible de transmettre qu'une seule phrase pour les générations futures, quelle affirmation pourrait contenir le plus grand nombre d'informations dans le plus petit nombre de mots ? Je crois que ce serait l'hypothèse selon laquelle toutes les choses sont constituées d'atomes. Cette phrase concentre une quantité énorme d'informations sur le monde, si on y ajoute un peu d'imagination et de réflexion¹⁰.

Démocrite, sans disposer de toute la physique moderne, était déjà arrivé à l'idée que tout est constitué d'atomes. Comment a-t-il fait ?

Il avait des arguments fondés sur l'observation. Par exemple, il imaginait (à juste titre) que l'usure d'une roue ou le séchage du linge étendu peuvent être dus à la perte lente d'infimes particules de bois ou d'eau. Il avait aussi des arguments d'ordre philosophique. Arrêtons-

nous sur ces derniers, car ils jouent aussi un rôle dans la gravité quantique.

Démocrite observe que la matière ne peut être un tout continu, car il y a là quelque chose de contradictoire. Nous connaissons son argumentaire grâce à Aristote¹¹. Imaginez, dit Démocrite, que la matière soit divisible à l'infini, c'est-à-dire qu'elle puisse être morcelée un nombre infini de fois. Imaginez alors que vous émiettez un morceau de matière, précisément à l'infini. À quoi ressemblerait-il ?

Pourrait-il s'agir de particules avec une dimension étendue ? Non, car si c'était le cas, le morceau de matière ne serait pas morcelé à l'infini. Il ne devrait donc rester que des *points* sans extension. Mais, à présent, essayons de recomposer le morceau de matière à partir des points : en rapprochant deux points sans extension, on n'obtient pas une chose étendue, pas davantage avec trois ni avec quatre points. On aura beau rapprocher des points, on n'aura aucune dimension, car les points n'ont pas d'extension. Par conséquent, on ne peut pas penser que la matière soit constituée de points sans extension : on aurait beau les rapprocher, on n'obtiendrait jamais quelque chose avec une dimension étendue. La seule possibilité, conclut Démocrite, c'est qu'un morceau quelconque de matière soit constitué d'un nombre *fini* de petits morceaux précis, invisibles, mais chacun avec une dimension *finie* : les atomes.

L'origine de cette manière subtile d'argumenter est antérieure à Démocrite. Elle vient du Cilento, en Italie du Sud, d'une petite cité, l'actuelle Velia qui, au v^e siècle avant J.-C., s'appelait Élée, une florissante colonie grecque. Y avait vécu Parménide, un philosophe qui avait vraiment pris à la lettre, trop peut-être, le rationalisme milésien et la grande idée, née à Milet, selon laquelle la raison nous montre combien les apparences peuvent être trompeuses. Parménide avait exploré une voie de pure raison vers la vérité, qui l'avait même conduit

à déclarer illusoire toute apparence, ouvrant la voie à la métaphysique et s'éloignant peu à peu de ce qui, plus tard, serait appelé « science naturelle ».

Son disciple Zénon, lui aussi d'Élée, avait apporté des arguments subtils en faveur de ce rationalisme radical, qui nie la crédibilité de l'apparence. Parmi ces arguments, on compte une série de paradoxes, devenus célèbres sous le nom de « paradoxes de Zénon », qui cherchent à montrer que toute apparence est illusoire, en argumentant que l'idée commune de mouvement est absurde ¹².

Le plus célèbre de ces paradoxes est présenté sous la forme d'une petite fable : la tortue défie Achille à la course, en partant avec un avantage de 10 mètres. Achille parviendra-t-il à rattraper la tortue ? Pour Zénon, logiquement, Achille ne pourra pas la rattraper. Auparavant, en effet, il devra parcourir ces 10 mètres et, pour cela, il emploiera un certain temps. Pendant ce temps, la tortue aura avancé de quelques décimètres. Pour franchir ces décimètres, Achille mettra encore du temps, mais entre-temps la tortue aura encore progressé, et ainsi à l'infini. Achille a donc besoin d'un nombre *infini* d'instants pour rattraper la tortue, or un *nombre infini d'instants*, argumente Zénon, c'est un *temps infini*. Il conclut donc que, logiquement, Achille mettra un temps infini à rattraper la tortue ; autrement dit, nous ne verrons jamais Achille la rattraper. Mais comme nous voyons Achille rattraper et dépasser toutes les tortues qu'il veut, il s'ensuit que ce que nous voyons est irrationnel, c'est-à-dire illusoire.

Avouons-le : ce n'est pas très convaincant. Où est l'erreur ? On peut répondre que Zénon se trompe parce qu'il n'est pas vrai que, en ajoutant un nombre infini de choses, on obtienne une chose infinie. Prenez une cordelette, coupez-en la moitié, puis la moitié de la moitié, et ainsi de suite à l'infini. À la fin, vous obtiendrez un nombre infini de cordelettes, de plus en plus petites, mais dont la somme sera finie, car

elle sera aussi longue que la cordelette initiale. Et donc, un nombre infini de cordelettes peut faire une cordelette finie ; un nombre infini d'instants peut faire un temps fini, et le héros, même s'il doit franchir un nombre infini de distances, de plus en plus courtes, en mettant pour chacune d'elles un temps fini, finira par rattraper la tortue en un temps fini¹³.

Le paradoxe apparent semble résolu. La solution est l'idée du continu, c'est-à-dire l'idée qu'il peut exister des temps arbitrairement petits dont un nombre infini donne un temps fini. Aristote est le premier à avoir l'intuition de cette possibilité, que développeront plus en détail les mathématiques modernes.

Mais s'agit-il bien de la solution correcte du monde *réel* ? Existe-t-il vraiment des cordelettes arbitrairement petites ? Pouvons-nous vraiment découper une corde en un nombre *arbitrairement grand* de fois ? Existe-t-il vraiment des temps et des espaces infiniment petits ? Tel est le problème que devra régler la gravité quantique.

Selon une tradition antique, Zénon avait rencontré Leucippe et avait fait de lui son disciple. Leucippe connaissait donc les casse-tête de Zénon. Mais il avait conçu une manière *différente* de les résoudre. Peut-être, suggérerait-il, n'existe-t-il rien d'arbitrairement petit : il y aurait alors une limite inférieure à la divisibilité.

L'Univers est granulaire, et non pas continu. Avec des points infiniment petits, on ne parviendrait jamais à construire l'extension (comme dans l'argument de Démocrite que rapporte Aristote). L'extension de la cordelette doit être formée d'un nombre *fini* d'objets de taille *finie*. La cordelette ne peut pas être découpée à l'infini ; la matière n'est pas continue, elle est faite d'atomes de taille finie.

Que l'argument soit juste ou faux, la conclusion – nous le savons aujourd'hui – contient une grande part de vérité. La matière a effectivement une structure atomique. Si je divise une goutte d'eau en

deux, j'obtiens deux gouttes d'eau. Je peux rediviser chacune de ces gouttes, et ainsi de suite. Mais je ne pourrai pas continuer jusqu'à l'infini. À un moment donné, j'aurai une seule molécule, et je serai arrivé au bout du processus. Il n'existe pas de gouttes d'eau plus petites qu'une molécule d'eau.

Comment le savons-nous aujourd'hui ? Les indices se sont accumulés au fil des siècles. Beaucoup nous sont venus de la chimie. Les substances chimiques sont toutes composées de combinaisons de quelques éléments et sont constituées de proportions exprimées par des nombres entiers. Les chimistes avaient élaboré une manière de penser les substances comme composées de molécules faites de combinaisons fixes d'atomes. Par exemple, l'eau, H_2O , est composée de deux parties d'hydrogène pour une d'oxygène.

Mais ce n'étaient là que des indices. Au début du siècle dernier encore, de nombreux scientifiques et philosophes considéraient encore l'hypothèse atomiste comme une ineptie. Entre autres l'important physicien et philosophe Ernst Mach, dont les idées sur l'espace seront capitales pour Einstein. À la fin d'une conférence de Boltzmann à l'Académie impériale des sciences à Vienne, Mach déclare publiquement : « Je ne crois pas que les atomes existent ! » Nous sommes en 1897. Beaucoup pensaient encore, comme lui, que la notation des chimistes n'était qu'une manière conventionnelle de résumer des règles de réactions chimiques, mais qu'il n'existait pas *vraiment* des molécules d'eau composées de deux atomes d'hydrogène et un d'oxygène. Les atomes ne se voient pas, disaient-ils, et on ne pourra jamais les voir. Et, d'abord, quelle dimension aurait un atome ? demandaient-ils. Démocrite n'avait évidemment pu mesurer la taille de ses atomes...

La preuve définitive de l'hypothèse atomiste de Leucippe et Démocrite, selon laquelle la matière est constituée d'atomes, a dû

attendre 1905. Elle fut apportée par un jeune homme de 25 ans, rebelle et agité, qui avait étudié la physique mais sans parvenir à trouver un poste de physicien ; il vivait chichement comme employé au bureau des brevets de Berne. Je parlerai abondamment de ce jeune homme dans le reste de ce livre, ainsi que des trois articles qu'il adressa en 1905 à la revue de physique la plus prestigieuse de l'époque, les *Annalen der Physik*. Le premier de ces articles contient la preuve définitive de l'existence des atomes, dont il calcule la taille, résolvant une fois pour toutes le problème qu'avaient ouvert Leucippe et Démocrite vingt-trois siècles auparavant.

Le nom de ce jeune homme est, évidemment, Albert Einstein (figure 1.3).



Figure 1.3. Albert Einstein.

Comment fait-il ? Son idée est étonnamment simple. N'importe qui aurait pu y arriver, depuis l'époque de Démocrite, s'il avait eu la perspicacité d'Einstein et une maîtrise suffisante des mathématiques pour effectuer le calcul, qui est complexe. L'idée est la suivante : si nous observons attentivement des particules très petites, comme des poussières dans l'air ou un grain de pollen en suspension dans un liquide, nous les voyons animées d'un mouvement permanent. Elles se déplacent au hasard en zigzaguant et, de cette façon, s'éloignent progressivement de leur position initiale. Ce mouvement en zigzag des particules dans un fluide a été appelé « mouvement brownien », du nom de Robert Brown, un botaniste qui l'avait décrit précisément au XIX^e siècle. La [figure 1.4](#) illustre la trajectoire typique d'une particule brownienne. Tout se passe comme si les particules recevaient des coups de pied au hasard, de tous côtés. Et ce n'est pas « comme si » elles recevaient des coups : c'est bien le cas. Elles bougent parce qu'elles sont heurtées par les molécules d'air, qui frappent le grain tantôt d'un côté, tantôt de l'autre.

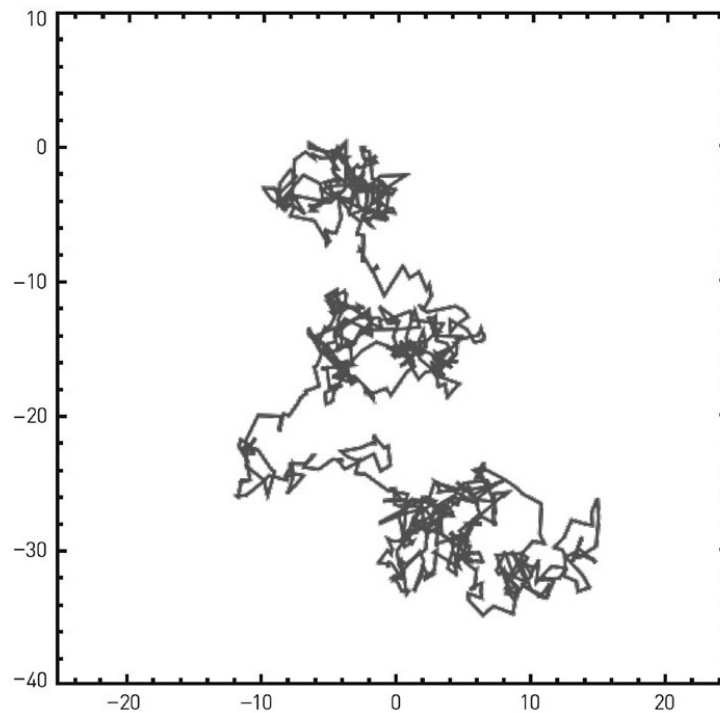


Figure 1.4. Une trajectoire brownienne typique.

Le point délicat est le suivant. Les molécules de l'air sont innombrables et, *en moyenne*, il y en a autant qui heurtent le grain par la gauche qu'il y en a qui le heurtent par la droite. Si les molécules d'air étaient infiniment petites et infiniment nombreuses, l'effet des heurts s'équilibrerait exactement à chaque instant, et le grain ne bougerait pas. Mais la dimension finie des molécules et le fait qu'elles sont en nombre fini et non pas infini font qu'il y a des *fluctuations* (voilà le mot clé) : les heurts ne s'équilibrent jamais exactement à chaque moment, mais *en moyenne*. Imaginez un moment que les molécules de l'air soient en petit nombre et assez grosses : dans ce cas, le grain recevrait clairement un seul coup de temps en temps, tantôt de la droite, tantôt de la gauche, et il se déplacerait ainsi comme un ballon frappé par des gamins courant sur un terrain de football. En

effet, plus les molécules sont petites, plus les heurts s'équilibrent, et moins le grain se meut.

Ainsi, avec un peu de mathématiques, il est possible de remonter de l'observation du mouvement du grain à la dimension des molécules. C'est ce que fait le jeune Einstein. À partir des observations sur la dérive des grains dans les fluides, il calcule les dimensions des atomes de Démocrite, ces grains élémentaires dont est constituée la matière, et il fournit, deux mille trois cents ans après, la preuve définitive de l'exactitude de l'intuition majeure de Démocrite : la matière est granulaire.

La nature des choses

*« Carmina sublimis, tunc sunt peritura Lucreti, exitio terras
cum dabit una dies. »*

OVIDE, *Amores* ¹⁴.

Souvent, je pense que la perte des œuvres complètes de Démocrite ¹⁵ est la plus grande tragédie intellectuelle provoquée par l'effondrement de la civilisation antique. J'invite le lecteur à parcourir la liste des titres de Démocrite cités en note ; il est évident que nous avons perdu là une grande partie de la pensée scientifique antique.

Malheureusement, il nous est resté tout Aristote, sur lequel on a ensuite reconstruit la pensée occidentale, mais rien de Démocrite. Peut-être que, s'il nous était tout resté de Démocrite et rien d'Aristote, l'histoire intellectuelle de notre civilisation aurait été plus heureuse.

Mais des siècles de pensée unique, dominatrice, monothéiste, n'ont pas permis la survie du naturalisme rationaliste et matérialiste de Démocrite. La fermeture des écoles de pensée antiques et la

destruction des textes qui n'étaient pas en accord avec la pensée chrétienne ont été générales et systématiques, après la brutale répression antipaïenne qui a suivi les édits de l'empereur Théodose de 390-391 après J.-C., déclarant le christianisme religion unique et obligatoire de l'Empire. Platon et Aristote, des païens qui croyaient en l'immortalité de l'âme, pouvaient être tolérés par un christianisme triomphant, pas Démocrite.

Un ouvrage a échappé au désastre et nous est parvenu intégralement, grâce auquel nous connaissons un peu l'atomisme antique et surtout l'esprit de cette science : le splendide poème *De la nature* – le *De rerum natura* – du poète latin Lucrèce.

Lucrèce adhère à la philosophie d'Épicure, élève d'un élève de Démocrite. Épicure s'intéresse à des questions d'ordre plus éthique que scientifique, et il n'a pas la profondeur de vue de Démocrite. Il traduit parfois de manière superficielle l'atomisme démocritéen. Mais sa vision du monde naturel est en substance celle du grand philosophe d'Abdère. Lucrèce met en évidence la pensée d'Épicure, donc l'atomisme de Démocrite, et sauve ainsi une partie de cette pensée de la catastrophe intellectuelle des siècles obscurs.

Lucrèce chante les atomes, la mer, la nature, le ciel. Il met en vers lumineux des questions philosophiques, des idées scientifiques et de subtils arguments.

Puis je dirai par quel effet la nature souveraine régit le cours du soleil et les phases de la lune, pour que nous n'allions pas croire qu'entre ciel et terre, libres et spontanés, ils courent éternellement [...], ou qu'ils roulent suivant une norme divine¹⁶.

La beauté du poème est dans le sentiment d'émerveillement qui envahit la grande vision atomiste. Le sentiment de profonde unité des choses qui naît de ce que nous sommes faits de la même substance que les étoiles et la mer :

Tous enfin, de semence céleste nous sommes issus. Le ciel est notre Père, car ses gouttes limpides fécondent la Mère accueillante et généreuse, la terre qui enfante les blondes moissons, les arbres florissants, les hommes et les bêtes, fournit à tous la nourriture qui repaît les corps, permet de mener douce vie et de se reproduire [...] ¹⁷.

Le poème dégage un sentiment de calme lumineux et de sérénité, issu de la compréhension qu'il n'y a pas de dieux capricieux qui nous demandent des choses difficiles et qui nous punissent. On sent une joie vibrante et légère, dès les tout premiers vers, dédiés à Vénus, symbole éclatant de la force créatrice de la nature :

[...] tu parais, Déesse, et les vents, les nuages te fuient, pour toi la terre ingénieuse parsème le chemin de fleurs suaves, pour toi l'océan rit en ses flots et le ciel pacifié brille d'un fluide éclat ¹⁸.

Il y a une acceptation profonde de la vie dont nous faisons partie...

Ne voient-ils pas l'évidence ? La nature en criant ne réclame rien d'autre sinon que la douleur soit éloignée du corps, que l'esprit jouisse de sensations heureuses, délivré des soucis et de crainte affranchi ¹⁹.

... et une acceptation sereine de la mort inévitable efface tout mal, qu'on n'a aucune raison de craindre. Pour Lucrèce, la religion est ignorance, et la raison est la lumière qui nous éclaire.

L'ouvrage de Lucrèce, oublié pendant des siècles, a été retrouvé en janvier 1417 dans la bibliothèque d'un monastère allemand par l'humaniste Poggio Bracciolini. Poggio, secrétaire de nombreux papes, était un chasseur passionné de livres antiques, dans le sillage des grandes redécouvertes de Pétrarque. Sa redécouverte du texte de Quintilien a modifié les cours des facultés de droit de toute l'Europe et sa redécouverte du traité d'architecture de Vitruve a transformé la manière de construire les palais. Mais son grand triomphe est d'avoir exhumé Lucrèce. Le livre trouvé par Poggio a été perdu, mais la copie qu'en a faite son ami Niccolò Niccoli est conservée à Florence, à la Biblioteca Laurenziana, sous le nom de *Codex laurentien 35.30*.

Certes, le terrain était déjà fertile pour accueillir quelque chose de nouveau, quand Poggio a rendu à l'Europe le livre de Lucrèce. Déjà la génération de Dante avait pu entendre des accents novateurs :

Vous qui par les yeux m'avez percé le cœur
et réveillé ma conscience qui dormait,
voyez ma vie angoissée,
faite de soupirs que détruit Amour²⁰.

Mais la redécouverte du *De rerum natura* a eu un effet profond sur la Renaissance italienne et européenne²¹, et son écho résonne de Galilée²² à Kepler²³, et de Bacon à Machiavel. Chez Shakespeare, un siècle après Poggio, on trouve une charmante apparition des atomes :

MERCUTIO. – Oh ! Je vois bien, la reine Mab vous a fait visite.
Elle est la fée accoucheuse et elle arrive, pas plus grande

qu'une agate à l'index d'un *alderman*, traînée par un attelage de petits atomes à travers les nez des hommes qui gisent endormis²⁴.

Les *Essais* de Montaigne contiennent une bonne centaine de citations de Lucrèce. Mais l'influence directe de Lucrèce touche aussi Newton, Dalton, Spinoza, Darwin, et va jusqu'à Einstein. L'idée même d'Einstein selon laquelle l'existence des atomes est révélée par le mouvement brownien des infimes particules immergées dans un fluide peut remonter à Lucrèce. Voici le passage du *De rerum natura* où Lucrèce illustre des arguments en faveur (une « preuve vivante ») de l'idée des atomes :

L'image ou simulacre du fait que je rapporte, nous l'avons sans cesse présente à nos yeux. Quand les lumières, quand les rayons du soleil se glissent dans l'obscurité d'une chambre, contemple. Tu verras parmi le vide maints corps minuscules se mêler de maintes façons dans les rais de lumière [...]. C'est ainsi que tu peux saisir par conjecture l'éternelle agitation des atomes dans le grand vide. [...]

Il est encore une raison de mieux observer les corps se bousculant parmi les rayons du soleil : de telles turbulences signifient qu'au-dessous la matière est agitée de mouvements obscurs. Oui, tu verras souvent ces corps changer de route et retourner en arrière sous d'aveugles chocs, tantôt ici, tantôt là, partout et en tous sens.

Cette errance est due aux principes des choses : ils sont les premiers à se mouvoir d'eux-mêmes, puis les corps dont l'assemblage est le plus petit, les plus proches pour ainsi dire de la force des atomes, se meuvent sous la poussée des chocs

aveugles et frappent à leur tour des corps un peu plus grands. Ainsi, depuis les atomes, le mouvement s'élève, peu à peu il parvient à nos sens jusqu'à nous faire voir l'agitation des corps dans un rayon de soleil, mais les chocs originels demeurent invisibles²⁵.

Einstein a ressuscité la « preuve vivante » présentée par Lucrèce et sans doute initialement conçue par Démocrite, et il l'a étayée en la traduisant en termes mathématiques, parvenant ainsi à calculer les dimensions des atomes.

L'Église catholique a tenté d'en finir avec Lucrèce : en décembre 1516, le synode florentin en interdit la lecture dans les écoles. En 1551, le concile de Trente met au ban l'ouvrage de Lucrèce. Trop tard. Toute une vision du monde, évincée par le fondamentalisme chrétien du Moyen Âge, réapparaît dans une Europe qui a de nouveau les yeux ouverts. Ce n'est pas seulement le naturalisme, le rationalisme, l'athéisme, le matérialisme de Lucrèce qui s'offrent de nouveau à l'Europe. Ce n'est pas seulement une méditation brillante et sereine sur la beauté du monde. C'est bien davantage : une structure articulée et complexe pour penser la réalité, une méthode nouvelle et radicalement différente de la pensée médiévale qui a prévalu pendant des siècles²⁶.

Le cosmos médiéval, merveilleusement chanté par Dante, était fondé sur une organisation spirituelle et hiérarchique de l'Univers qui reflétait l'organisation hiérarchique de la société européenne : une structure sphérique du cosmos centré sur la Terre, la séparation irréductible entre Terre et Ciel, des explications finalistes et métaphoriques de tous les phénomènes naturels, la crainte de Dieu et de la mort, peu d'attention à la nature, l'idée que des formes antérieures aux réalités dictent la structure du monde, l'idée que la

connaissance ne peut avoir pour sources que le passé, la révélation et la tradition...

Rien de tout cela dans le monde de Démocrite chanté par Lucrèce. Ni crainte des dieux, ni buts ou causes du monde, ni hiérarchie cosmique, ni distinction entre la Terre et le Ciel. Mais un amour profond pour la nature, une immersion sereine en elle, la conscience d'en faire intimement partie, que les hommes, les femmes, les animaux, les plantes, les nuages sont des éléments organiques d'un tout merveilleux et sans hiérarchies. On y sent un profond universalisme, dans le sillage des paroles splendides de Démocrite : « Pour le sage, toute terre est accessible ; l'univers entier est la patrie d'une âme honnête²⁷. »

On y trouve l'ambition de pouvoir penser le monde en termes simples. De pouvoir rechercher et connaître les secrets de la nature. De pouvoir en savoir plus que ce que savaient nos pères. On y trouve d'extraordinaires outils conceptuels sur lesquels bâtiront Galilée, Kepler et Newton : l'idée du mouvement libre et rectiligne dans l'espace ; l'idée des corps élémentaires et de leurs interactions, qui constituent le monde ; l'idée de l'espace comme contenant de l'Univers.

Et l'on y trouve l'idée simple d'une limite à la divisibilité des choses : la nature granulaire du monde. Une idée qui arrête l'infini qui peut fuir comme du sable entre nos doigts. Cette idée est à la base de l'hypothèse atomiste, mais elle reviendra avec plus de force avec la mécanique quantique et elle se révèle de nouveau nécessaire aujourd'hui, comme clé de voûte de la gravité quantique.

Le premier qui saura reconstituer la mosaïque qui commence à se dessiner à partir du naturalisme de la Renaissance – et replacer la grande vision démocritéenne, considérablement renforcée, au centre de la pensée moderne – sera le plus grand des hommes de science de tous les temps, et le premier protagoniste du chapitre suivant.

-
1. Sur la pensée scientifique des Milésiens, en particulier celle d'Anaximandre, voir C. Rovelli, *Anaximandre de Milet ou la Naissance de la pensée scientifique*, Dunod, 2009.
 2. L'origine milésienne de Leucippe est citée, par exemple, par Simplicius (voir M. Andolfo, *Atomisti antichi. Frammenti e testimonianze*, Rusconi, 1999, p. 103), mais elle n'est pas certaine. Une alternative rapportée par les Anciens est Élée. La référence à Milet et à Élée est significative, eu égard aux racines culturelles de sa pensée ; la dette de Leucippe envers Zénon d'Élée est discutée dans les pages qui suivent.
 3. Sénèque, *Naturales quaestiones*, VII, 3, 2d.
 4. Cicéron, *Academica priora*, II, 23, 73.
 5. Sextus Empiricus, *Adversus mathematicos*, VII, 135.
 6. Cf. Aristote, *De generatione et corruptione*, A1, 315b 6.
 7. On trouvera un recueil de fragments et de témoignages anciens sur l'atomisme in M. Andolfo, *Atomisti antichi*, op. cit. Salomon Luria propose un beau recueil complet de fragments et de témoignages sur Démocrite (voir *Democrito, Raccolta dei frammenti*, Bompiani, 2007).
 8. Un ouvrage récent sur la pensée de Démocrite, qui en met en lumière l'humanisme : S. Martini, *Democrito : filosofo della natura o filosofo dell'uomo ?*, Armando, 2002.
 9. Platon, *Phédon*, 98c-d, in *Œuvres complètes*, tr. Léon Robin, Gallimard, « Bibliothèque de la Pléiade », 1950, t. I, p. 825.
 10. R. Feynman, *Le Cours de physique de Feynman*, Dunod, 2014, livre I, chapitre 1.
 11. Cf. Aristote, *De generatione et corruptione*, A2, 316a.
 12. Un beau livre récent sur les paradoxes de Zénon et sur leur importance philosophique et mathématique actuelle : V. Fano, *I paradossi di Zenone*, Carocci, 2012.
 13. En termes techniques, il existe des séries infinies convergentes. Celle de l'exemple de la cordelette est $\sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n}$, qui converge vers 1. Les sommes infinies convergentes n'étaient pas comprises au temps de Zénon. Archimède toutefois les comprenait, et il s'en est servi pour calculer des aires. Newton les utilisait, mais il a fallu attendre le ^e^e XIX siècle, avec Bolzano et Weierstrass, pour parvenir à une clarté conceptuelle totale sur ces objets mathématiques. Aristote, en tout cas, indique déjà cette direction pour répondre à Zénon ; la distinction aristotélicienne entre infini en acte et infini en puissance contient déjà la distinction clé entre l'absence de limite à la divisibilité et la possibilité d'avoir déjà divisé quelque chose une infinité de fois.

14. « Les vers du sublime Lucrèce / ne périront que le jour où toute la terre sera détruite. » Ovide, *Les Amours*, I, 15, 23-24.

15. Voici un échantillon d'ouvrages de Démocrite dont le titre nous est transmis par Diogène Laërce : *Le Grand Diascome* ; *Le Petit Diascome* ; *Cosmographie* ; *Des planètes* ; *De la nature* ; *De la nature humaine* ; *De l'esprit* ; *Des sensations* ; *De l'âme* ; *Des saveurs* ; *Des couleurs* ; *Des diverses trajectoires des atomes* ; *De la transformation des figures* ; *Causes célestes* ; *Causes de l'air* ; *Causes du feu et de son contenu* ; *Causes des sons* ; *Causes des germes, des plantes et des fruits* ; *Causes des animaux* ; *Description du ciel* ; *Géographie* ; *Description du pôle* ; *De la géométrie* ; *Des réalités géométriques* ; *De la tangence du cercle et de la sphère* ; *Les nombres* ; *Des nombres irrationnels et des solides* ; *Projections* ; *Astronomie* ; *Table astronomique* ; *Du rayon lumineux* ; *Des images réfléchies* ; *Des rythmes et de l'harmonie* ; *De la poésie* ; *De la beauté épique* ; *De la consonance et de la dissonance* ; *Des lettres d'Homère* ; *De la justesse des vers et des termes* ; *Des mots* ; *Des noms* ; *De la vertu* ; *De la disposition du savant* ; *De la prévision médicale* ; *De l'agriculture* ; *De la peinture* ; *Tactique* ; *Les Périples océaniques* ; *De l'histoire* ; *La pensée des Chaldéens* ; *La Pensée des Phrygiens* ; *Des lettres sacrées de Babylone* ; *Des lettres sacrées de Méroé* ; *De la fièvre et des toux biliaires dérivées de maladie* ; *Des apories* ; *Questions légales* ; *Pythagore* ; *Canon des raisonnements* ; *Des confirmations* ; *Commentaires de morale* ; *La Bonne Humeur*. Tout a été perdu...

16. Lucrèce, *De rerum natura*, V, 76 (tr. fr. *De la nature*, Flammarion, « Garnier-Flammarion », 1997).

17. *Ibid.*, II, 990.

18. *Ibid.*, I, 6.

19. *Ibid.*, II, 16.

20. Guido Cavalcanti, *Rimes*.

21. On trouvera une reconstitution de la redécouverte de l'ouvrage de Lucrèce et de son impact sur la culture européenne dans S. Greenblatt, *The Swerve : How the World Became Modern*, W. W. Norton, 2011 (tr. fr. *Quattrocento*, Flammarion, 2013).

22. Cf. M. Camerota, « Galileo, Lucrezio e l'atomismo », in F. Citti, M. Beretta (dir.), *Lucrezio, la natura e la scienza*, Leo S. Olschi, 2008, p. 141-175.

23. Cf. R. Kargon, *Atomism in England from Harriot to Newton*, Oxford University Press, 1966.

24. W. Shakespeare, *Roméo et Juliette*, I, 4.

25. Lucrèce, *De rerum natura*, II, 112-141.

26. Piergiorgio Odifreddi a publié une belle traduction commentée du texte de Lucrèce, destinée aux enfants des écoles (*Come stanno le cose. Il mio Lucrezio, la mia Venere*, Milan, Rizzoli, 2013). Il serait bon que de nombreuses écoles adoptent ce

livre et que ce texte extraordinaire soit mieux connu. Une lecture diamétralement opposée au commentaire d'Odifreddi est celle, romantique, offerte par V. E. Alfieri, *Lucrezio* (Le Monnier, 1929), qui met en lumière la bouleversante poésie de l'ouvrage et qui y voit une image très noble, mais amère, du caractère de son auteur.

27. H. Diels, W. Kranz (éd.), *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Weidmann, 1903, 68 b 247.

CHAPITRE 2

Les classiques

Isaac et la petite lune

Au chapitre précédent, j'ai pu donner l'impression de dire que Platon et Aristote n'ont fait que nuire au développement de la pensée scientifique. Je voudrais ici préciser ce point. Les travaux d'Aristote sur la nature – par exemple sur la botanique et sur la zoologie – sont d'extraordinaires ouvrages scientifiques, fondés sur une observation minutieuse du monde naturel. Sa clarté conceptuelle, son attention à la variété de la nature, son intelligence remarquable et l'étendue de sa pensée ont été des modèles des siècles durant. La première grande physique systématique que nous connaissions est la sienne, et elle est bien loin d'être mauvaise.

Aristote l'expose dans un livre intitulé, précisément, *Physique*. Le livre n'a pas emprunté son titre au nom de la discipline traitée : c'est plutôt la discipline qui a emprunté son nom au livre. Pour Aristote, la physique fonctionnait comme suit. Avant tout, il faut distinguer le Ciel et la Terre. Dans le Ciel, tout est fait d'une substance cristalline qui se meut de façon circulaire et éternelle autour de la Terre, selon de

grandes sphères concentriques, avec la Terre, sphérique, au centre. Sur la Terre, en revanche, on doit distinguer le mouvement forcé du mouvement naturel. Le mouvement forcé est causé par une force et il s'arrête quand s'arrête la force. Le mouvement naturel advient à la verticale, vers le haut ou vers le bas, selon les substances. Chaque substance a son « lieu naturel », c'est-à-dire un niveau propre où elle retourne toujours : la terre tout en bas, l'eau un peu plus au-dessus, l'air plus haut encore et le feu encore plus haut. Quand nous soulevons un caillou et que nous le lâchons, il se meut vers le bas, par un mouvement naturel, pour revenir au niveau qui lui est propre. En revanche, les bulles d'air dans l'eau, ou le feu dans l'air, vont vers le haut, toujours pour regagner leur lieu naturel.

Ne sourions pas de cette physique naturelle et ne la déconsidérons pas, comme on le fait souvent ; il s'agit d'une excellente physique. C'est une bonne description, très correcte, du mouvement des corps immergés dans un fluide et sujets à la gravité et au frottement, comme le sont effectivement tous les corps dans notre expérience quotidienne. Ce n'est pas une physique erronée, comme on le dit souvent¹. C'est seulement une approximation. Mais la physique de Newton sera elle aussi une approximation de la relativité générale. Et, probablement, tout ce que nous savons aujourd'hui est aussi une approximation de quelque chose d'autre que nous ne connaissons pas encore. La physique d'Aristote est encore quelque peu grossière, peu quantitative (on n'y effectue aucun calcul), mais elle est très cohérente, rationnelle et capable d'effectuer des prédictions qualitatives correctes. Ce n'est pas pour rien qu'elle est restée pendant des siècles un modèle pour expliquer le mouvement du monde.

Mais peut-être Platon a-t-il été plus important encore pour le progrès futur de la science. C'est lui qui a compris la portée de la grande intuition de Pythagore et du pythagorisme : la clé pour

progresser et pour dépasser Milet, ce sont les mathématiques. Pythagore est né à Samos, une petite île face à Milet, et ses biographes antiques, comme Jamblique et Porphyre, rapportent qu'il a été le disciple d'Anaximandre. Tout naît à Milet. Pythagore a voyagé longtemps, sans doute en Égypte et jusqu'à Babylone, avant de s'établir au sud de l'Italie, à Crotone, où il a fondé une secte scientifico-politico-religieuse qui a beaucoup pesé sur la politique de la cité et qui a laissé un héritage essentiel au monde entier : la découverte de l'importance théorique des mathématiques. On lui attribue cette formule : « C'est le nombre qui gouverne les formes et les idées². »

Platon a débarrassé le pythagorisme de l'encombrant bagage mystique dont il était imprégné, pour en distiller le message utile : les mathématiques sont le langage adéquat pour comprendre et décrire le monde. La portée de cette intuition est immense, et c'est une des raisons du succès de la science occidentale. Selon la tradition, Platon a fait graver au fronton de son école : « Nul n'entre ici s'il n'est géomètre. »

Fort de cette conviction, Platon a alors posé la question décisive, celle à partir de laquelle naîtra, après de longs détours, la science moderne. À ses disciples qui étudiaient les mathématiques, il a demandé de découvrir les lois que suivent les corps célestes. Vénus, Mars et Jupiter se voient bien dans le ciel nocturne et semblent évoluer un peu au hasard, en avant et en arrière parmi les autres étoiles : peut-on trouver une mathématique capable d'en décrire et d'en prédire les mouvements ?

L'exercice, initié par Eudoxe dans l'école même de Platon et développé aux siècles suivants par de très grands astronomes comme Aristarque et Hipparque, a porté l'astronomie antique à un très haut niveau scientifique. Nous connaissons les succès de cette astronomie grâce à un seul livre, le seul qui nous soit resté, l'*Almageste* de

Ptolémée. Ptolémée est un astronome qui a vécu à Alexandrie au I^{er} siècle de notre ère, à la période romaine, quand la science déclinait déjà, et un peu avant qu'elle disparaisse totalement, emportée dans l'effondrement du monde hellénique, puis étouffée par la christianisation de l'Empire.

L'*Almageste* est un grand livre de science. Rigoureux, précis, complexe, il présente un système d'astronomie mathématique capable de prévoir les mouvements apparemment fortuits des planètes dans le ciel, avec une excellente précision étant donné les capacités d'observation limitées de l'œil humain. Ce livre est la preuve que l'intuition de Pythagore fonctionne. Les mathématiques permettent de décrire le monde et de prévoir le futur : les mouvements apparemment errants et désordonnés des planètes peuvent être prévus de façon exacte en usant de formules mathématiques, que Ptolémée, en résumant les résultats de siècles de travaux des astronomes grecs, expose de manière synthétique et magistrale. Aujourd'hui encore, moyennant quelques efforts, on peut ouvrir le livre de Ptolémée, en apprendre les techniques et *calculer* la position, par exemple, de Mars, dans le ciel *futur*, c'est-à-dire dans notre ciel d'aujourd'hui, deux mille ans après qu'elles ont été formulées. Avoir compris que de telles prouesses sont possibles est la base de la science moderne, et nous ne la devons pas qu'un peu à Pythagore et à Platon.

Après l'effondrement de la science antique, plus personne, autour de la Méditerranée, n'a été en mesure de comprendre Ptolémée ni les très rares autres grands livres de la science antique qui avaient survécu à la catastrophe, comme par exemple les *Éléments* d'Euclide. Mais en Inde, où le savoir grec était parvenu grâce aux nombreux échanges commerciaux et culturels, ces livres ont été étudiés et compris. D'Inde, ce savoir est retourné vers l'Occident grâce à des savants persans et arabes cultivés qui ont su le comprendre et le préserver. Cependant,

l'astronomie n'a pas fait de progrès très significatifs pendant plus de mille ans.

Plus ou moins à l'époque où Poggio dénichait le manuscrit de Lucrèce, un jeune Polonais, venu étudier d'abord à Bologne puis à Padoue, s'enivrait du climat effervescent de l'humanisme italien et s'enthousiasmait pour les textes antiques. Il signait à la manière latine : Nicolaus Copernicius. Le jeune Copernic étudie l'*Almageste* de Ptolémée et s'en éprend. Il décide de consacrer sa vie à l'astronomie et à suivre les traces du grand Ptolémée.

Mais les temps sont mûrs désormais et Copernic, plus d'un millénaire après Ptolémée, fera le saut que des générations d'astronomes indiens, arabes et persans n'avaient pas été capables de faire : non simplement apprendre, appliquer et ajuster le système ptolémaïque, mais l'améliorer à fond, en ayant le courage de le modifier en profondeur. Au lieu de décrire des corps célestes qui tournent autour de la Terre, Copernic va écrire une espèce de version revue et corrigée de l'*Almageste* dans laquelle, cependant, le Soleil est au centre et la Terre, avec les autres planètes, tourne autour de lui.

De cette façon, espérait Copernic, les calculs seraient plus faciles. À vrai dire, ils ne fonctionnaient pas beaucoup mieux que ceux de Ptolémée, et même, en fin de compte, un peu plus mal. Mais l'idée était bonne. Il faudra Johannes Kepler, à la génération suivante, pour bien utiliser le système de Copernic. Kepler, en travaillant comme un bénédictin, patiemment, résolument, sur de nouvelles observations précises de la position des planètes dans le ciel, montre que quelques nouvelles lois mathématiques simples décrivent exactement le mouvement des planètes autour du Soleil, avec une précision plus grande que celle qu'avaient obtenue les Anciens. Nous sommes en 1600 et, pour la première fois, on réussit à faire mieux que ce qu'on avait fait à Alexandrie plus de mille ans auparavant.

Tandis que dans le froid du Grand Nord Kepler calcule les mouvements dans le ciel, en Italie c'est avec Galilée que la nouvelle science commence à prendre son envol. Exubérant, polémiste, chicaneur, très cultivé, très intelligent et débordant d'inventivité, Galilée se fait envoyer de Hollande un exemplaire d'une nouvelle invention, la lunette d'approche, et fait un geste qui va changer l'histoire de l'humanité : il pointe la lunette vers le ciel.

Il voit des choses que nous, humains, ne pouvions imaginer : des anneaux autour de Saturne, des montagnes sur la Lune, des phases à la planète Vénus, des satellites autour de Jupiter... Chacun de ces phénomènes rend plus plausible l'idée de Copernic. Les instruments scientifiques commencent à ouvrir les yeux myopes de l'humanité sur un monde bien plus vaste et varié que ce qu'on avait imaginé jusque-là.

Mais la grande idée de Galilée, persuadé de l'exactitude du système copernicien et donc convaincu que la Terre est une planète comme les autres, est de tirer la déduction logique de la révolution cosmique opérée par Copernic : si les mouvements dans le ciel suivent des lois mathématiques précises, et si la Terre est une planète comme les autres et qu'elle fait ainsi partie elle aussi du ciel, alors sur la Terre aussi doivent exister des lois mathématiques précises gouvernant le mouvement des objets.

Confiant dans cette rationalité profonde de la nature, et dans le bon sens du rêve pythagorico-platonicien selon lequel la nature peut être comprise par les mathématiques, Galilée décide d'étudier *comment* se meuvent les corps sur la Terre lorsqu'ils sont abandonnés à eux-mêmes, c'est-à-dire lorsqu'ils tombent. Convaincu qu'une loi mathématique doit exister, il la cherche en faisant des essais. Pour la première fois dans l'histoire de l'humanité, il effectue une *expérimentation* : la science expérimentale commence avec Galilée. L'expérience est simple : il laisse tomber des corps, c'est-à-dire qu'il les

laisse suivre ce qui, pour Aristote, devait être leur mouvement naturel, et il essaie de mesurer avec précision à quelle vitesse ils tombent.

Le résultat est sensationnel : les corps ne tombent pas à une vitesse constante, comme on l'avait toujours cru. La vitesse augmente de façon régulière au cours de la chute. Ce qui est constant, ce n'est pas la vitesse de chute, mais l'accélération, c'est-à-dire la vitesse à laquelle la vitesse change. Il y a plus : cette accélération est la même pour tous les corps. Galilée la mesure et la trouve égale à

9,8 mètres par seconde par seconde,

ce qui signifie qu'à chaque seconde la vitesse d'un corps qui tombe augmente de 9,8 mètres par seconde. Retenez bien ce nombre $a = 9,8$. Telle est la première loi mathématique découverte pour les corps terrestres, la loi de la chute des corps : $x(t) = \frac{1}{2}at^2$. Jusqu'alors, on n'avait trouvé des lois mathématiques que pour le mouvement des planètes dans le ciel. La perfection mathématique n'appartenait donc pas qu'au ciel, comme le croyait Aristote.

Mais le résultat le plus important est encore à venir, et c'est le grand Isaac Newton qui l'obtiendra. Newton étudie de près les résultats de Galilée et de Kepler et, en les combinant, il découvre le diamant caché. Suivons son raisonnement, tel qu'il le raconte lui-même en utilisant l'idée de la « petite lune » dans son grand livre, les *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, livre fondateur de la science moderne.

Imaginons la Terre, écrit Newton, entourée de nombreuses lunes, comme Jupiter. Outre la vraie Lune, il existe d'autres lunes, en particulier une *petite lune* qui tourne autour de la Terre à très petite distance, disons en frôlant la Terre, à peine au-dessus des cimes des montagnes. À quelle vitesse cette petite lune tournerait-elle ? Une des

lois que Kepler avait trouvées lie le rayon de l'orbite à la période de révolution³. Puisque nous connaissons le rayon de l'orbite de la Lune (Hipparque l'avait mesuré dans l'Antiquité) et sa période (28 jours), nous pouvons calculer au moyen d'une simple proportion la période qu'aurait la petite lune. La proportion donne une période d'une heure et demie : la petite lune ferait le tour de la Terre en une heure et demie.

Or un objet qui tourne en rond ne va pas tout droit : il change continuellement la direction de sa vitesse, et tout changement de vitesse est une accélération. La petite lune subit donc une accélération vers le centre du cercle sur lequel elle se meut. Cette accélération est facile à calculer en connaissant le rayon et la vitesse de l'orbite ($a = \frac{v^2}{r}$), et donc nous pouvons la calculer. Newton effectue le calcul, qui est simple, et dont le résultat est...

9,8 mètres par seconde par seconde !

Exactement le même nombre que l'accélération mesurée par Galilée pour les corps qui tombent sur la Terre !

Simple coïncidence ? Impossible, raisonne Newton. Si l'effet est le même – une accélération vers le bas de 9,8 mètres par seconde par seconde –, la cause doit être la même. La cause qui fait tourner la petite lune sur son orbite doit être la même cause qui fait tomber les corps sur la Terre.

Nous appelons « gravité » la cause de la chute des corps. C'est donc cette même gravité qui doit faire tourner la petite lune autour de la Terre. Sans cette gravité, la petite lune ne resterait pas sur son orbite et partirait tout droit. Mais alors, les lunes de Jupiter sont attirées par Jupiter, et les planètes sont attirées par le Soleil ! Sans cette attraction,

chaque corps céleste irait tout droit, sans aucune accélération. Mais alors, l'Univers est un grand espace où les corps voyagent tout droit et s'attirent mutuellement par le biais de « forces ». Et il existe une force universelle de gravité grâce à laquelle tout corps attire tout autre corps...

Une vision grandiose prend forme. Brusquement, après des milliers d'années, il n'y a plus de séparation entre le Ciel et la Terre, il n'y a pas non plus de « niveau naturel » pour les choses comme le voulait Aristote, et il n'y a pas de centre du monde. Les choses abandonnées à elles-mêmes ne vont plus vers leur lieu naturel, mais se meuvent tout droit à jamais.

Un simple calcul sur l'hypothétique petite lune permet à Newton d'expliquer comment agit la force de gravité et d'en donner l'intensité ($F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$), déterminée par ce que nous appelons aujourd'hui la constante de Newton, baptisée G (pour « gravité »). La force de gravité, comprend Newton, agit également sur Terre et dans le ciel. Sur la Terre, elle fait tomber les objets, dans le ciel elle maintient les planètes et les satellites sur leurs orbites. La force est la même.

C'est un bouleversement complet de tout le schéma mental du monde aristotélicien et de la vision du monde qui avait dominé tout au long du Moyen Âge. Pensez à l'Univers de Dante, par exemple : comme pour Aristote, la Terre était une boule au centre de l'Univers, entourée par les sphères célestes. Ce n'est désormais plus le cas. L'Univers est un immense espace infini empli d'étoiles, sans centre ni limite. Il est parcouru par des corps matériels qui se déplacent de façon rectiligne et uniforme, à moins qu'une force, engendrée par un autre corps, n'agisse sur eux. La référence à l'atomisme antique est transparente chez Newton, même si celui-ci est formulé en termes conventionnels :

Il me semble très probable qu'au commencement Dieu forma la matière en particules solides et massives, dures, impénétrables, mobiles, de telles grandeurs et figures, avec telles autres propriétés, en tel nombre, en telle quantité, en telle proportion à l'espace⁴.

Le monde de la mécanique de Newton est simple, et il est résumé aux figures 2.1 et 2.2. C'est le monde de Démocrite qui revient. Un monde fait d'un immense espace indifférencié, égal à lui-même, où se déplacent pour l'éternité des particules qui agissent les unes sur les autres, et voilà tout. C'est le monde que chantera Leopardi :

M'asseyant et regardant, au-delà de la haie j'imagine d'interminables espaces, des silences surhumains, un profond repos où peu s'en faut que le cœur ne s'effraie...

Mais à présent la vision est bien plus puissante que celle de Démocrite, car ce n'est pas qu'une image pour essayer de mettre de l'ordre dans le monde : elle se combine aux mathématiques, à l'héritage de Pythagore et à la grande tradition de la physique mathématique de l'astronomie alexandrine. Le monde de Newton est le monde de Démocrite mathématisé.



Figure 2.1. De quoi le monde est-il fait ?

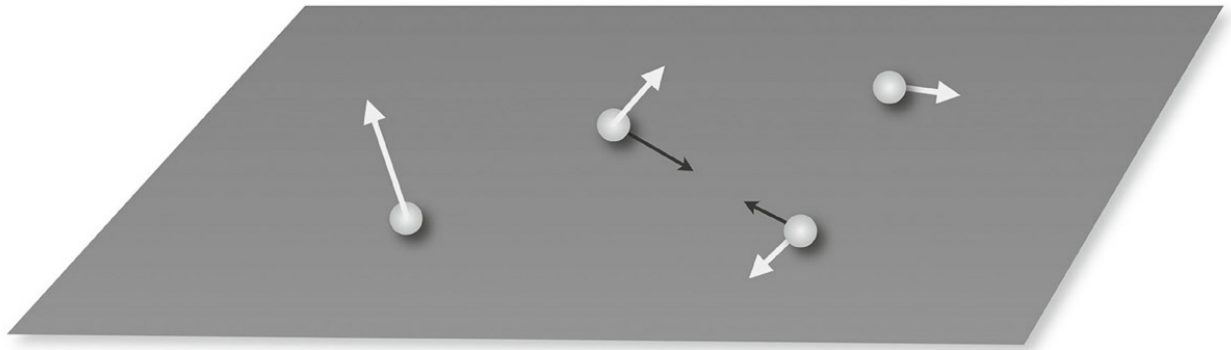


Figure 2.2. Le monde de Newton : des particules se déplaçant dans l'espace, au cours du temps, sont attirées par des forces.

Newton reconnaît sans hésitation la dette de la nouvelle physique envers la science antique. Par exemple, dès les premières lignes du *Système du monde*, il attribue (correctement) à l'Antiquité l'origine des idées de base de la révolution copernicienne : « Ce fut une très ancienne opinion des philosophes que, dans les parties hautes du monde, restent immobiles les étoiles fixes et que la Terre tourne autour du Soleil », même s'il a des idées un peu confuses sur qui soutenait quoi dans le passé, et s'il cite un peu au hasard tantôt l'un, tantôt l'autre : Philolaos, Aristarque de Samos, Anaximandre, Platon, Anaxagore, Démocrite et « le très savant Numa Pompilius, roi des Romains » !

La puissance de la nouvelle construction intellectuelle newtonienne se révèle immense, au-delà de toute espérance. Toute la technologie du monde du XIX^e siècle et de la modernité s'appuie dans une très large mesure sur les formules de Newton. Trois siècles se sont écoulés, mais c'est encore grâce à des théories fondées sur les équations de Newton que nous construisons aujourd'hui des ponts, des trains et des gratte-ciel, des moteurs et des systèmes hydrauliques, que nous savons faire

voler les avions, calculer les prévisions météorologiques, prévoir l'existence d'une planète avant de la voir, et que nous envoyons des engins spatiaux sur Mars... Le monde moderne n'aurait pu naître sans passer par la petite lune de Newton.

Une nouvelle et vaste conception du monde, une manière de penser qu'adoptera avec enthousiasme l'esprit des Lumières de Voltaire et de Kant, une façon concrète de calculer le futur. Un schéma de référence et un modèle pour toutes les autres sciences. Voilà ce qu'a été et ce que continue à être l'immense révolution intellectuelle apportée par Newton.

Il semble que la clé pour comprendre la réalité ait été révélée : le monde n'est fait que d'un grand espace infini, où, tandis que le temps s'écoule, se déplacent des particules qui s'attirent les unes les autres par le biais de forces. Tout semble réductible à ce schéma. Nous disposons des équations précises qui gouvernent ces mouvements, et ces équations se révèlent immensément efficaces. Au ^{xix}^e siècle encore, on écrivait que Newton avait été non seulement l'un des hommes les plus intelligents et les plus clairvoyants, mais aussi l'un des plus chanceux, car il n'existe qu'un seul système de lois fondamentales du monde et c'est à lui qu'est échue la chance de le découvrir. Tout semble clair.

Tout, vraiment ?

Michael : les champs et la lumière

Newton savait bien que ses équations ne décrivent pas *toutes* les forces présentes dans la nature. Il doit en exister d'autres que celle de la gravité pour pousser et attirer les corps. Les choses ne se meuvent pas seulement lorsqu'elles chutent. Un premier problème laissé ouvert

par Newton était ainsi de découvrir les *autres* forces. Mais la découverte des autres forces qui déterminent tout ce qui se produit autour de nous a dû attendre le XIX^e siècle, et a apporté deux énormes surprises.

La première est que presque tous les phénomènes observables dans la nature sont gouvernés par *une seule* autre force, en dehors de la gravité : la force que nous appelons aujourd'hui « électromagnétique ». C'est elle qui maintient la matière pour former des corps solides, qui maintient ensemble les atomes dans les molécules et les électrons dans les atomes, qui fait fonctionner la chimie et donc la matière vivante. C'est cette force qui agit dans les neurones de notre cerveau, y faisant circuler l'information sur le monde que nous percevons. C'est encore cette force qui engendre les frottements qui arrêtent un objet en mouvement, qui amortit l'atterrissage des parachutistes, qui fait tourner les moteurs électriques et les moteurs à explosion⁵, qui fait s'éclairer les ampoules, qui nous permet d'écouter la radio, etc.

La seconde surprise, cruciale pour ce qui concerne l'histoire que je raconte, est que l'explication du fonctionnement de cette force a réclamé une modification importante du monde de Newton – la modification à l'origine de la physique moderne, et la notion la plus importante à cerner pour comprendre la suite de ce livre : la notion de « champ ».

C'est un Britannique, et même deux, qui a (ont) compris comment fonctionne la force électromagnétique : Michael Faraday et James Clerk Maxwell, le couple le plus hétérogène de l'histoire des sciences (figure 2.3).



Figure 2.3. Michael Faraday et James Clerk Maxwell.

Michael Faraday est un pauvre Londonien sans éducation formelle, qui travaille d'abord chez un relieur de livres, puis dans un laboratoire où on le remarque. Il inspire confiance et il évolue jusqu'à devenir l'expérimentateur le plus génial et le plus grand visionnaire de la physique du XIX^e siècle. Sans connaître les mathématiques, il écrit un excellent livre de physique pratiquement sans aucune équation. Il voit la physique avec les yeux de l'esprit et, avec les yeux de l'esprit, il crée des mondes. James Clerk Maxwell, en revanche, est un riche Écossais issu d'une famille aristocratique et l'un des plus grands mathématiciens du siècle. Bien que séparés, en dehors de leurs origines sociales distinctes, par une différence de style intellectuel abyssale, ils

parviendront à s'entendre et, ensemble, en unissant leurs deux formes de génie, ils ouvriront la voie à la physique moderne.

Ce qu'on connaissait sur l'électricité et le magnétisme au début du XVIII^e siècle se limitait à quelques petits phénomènes amusants de bateleur : des baguettes en verre qui attirent des morceaux de papier, des aimants qui s'attirent et se repoussent, guère plus. L'étude de l'électricité et du magnétisme se poursuit lentement au XIX^e. Faraday travaille à Londres dans un laboratoire rempli de bobines, d'aiguilles, d'aimants, de lames et de petites cages en fer. Il observe comment s'attirent et se repoussent les corps électriques et les corps magnétiques. En bon newtonien, il essaie de comprendre quelles propriétés a la force qui agit entre les corps chargés ou les corps aimantés. Petit à petit, à force de manipuler ces objets, il aboutit à une intuition, qui se trouve à la base de la physique moderne. Il « voit » quelque chose de nouveau.

Son intuition est la suivante : il ne faut pas penser, comme le faisait Newton, à des forces qui agissent directement et à distance entre des objets éloignés. Il faut penser au contraire qu'il existe une entité réelle répandue partout dans l'espace, qui est modifiée par les corps électriques et magnétiques et qui, à son tour, agit sur les corps électriques et magnétiques. Cette entité, dont Faraday a l'intuition, s'appelle aujourd'hui un « champ ».

Qu'est-ce qu'un champ ? Faraday l'imagine formé de faisceaux de lignes très fines (infiniment fines) qui remplissent l'espace. Une immense toile d'araignée invisible, qui occupe tout ce qui nous entoure. Il appelle ces lignes « lignes de force », parce que ce sont des lignes qui, en quelque sorte, « portent la force » : elles répandent la force électrique et la force magnétique, un peu comme le feraient des câbles ([figure 2.4](#)).

Un objet avec une charge électrique (par exemple une baguette de verre frottée) déforme les champs électriques et magnétiques autour de lui ; à leur tour, ces champs produisent une force sur tout objet chargé. Donc, deux charges qui sont à une certaine distance l'une de l'autre s'attirent et se repoussent non pas directement, mais par le truchement du milieu qui s'interpose entre eux.

Si l'on prend deux aimants et qu'on les rapproche en éprouvant la force avec laquelle ils s'attirent et, surtout, se repoussent, il n'est pas très difficile d'expérimenter l'intuition de Faraday, en « sentant », à travers ses effets, le *champ* qui s'interpose entre les aimants.

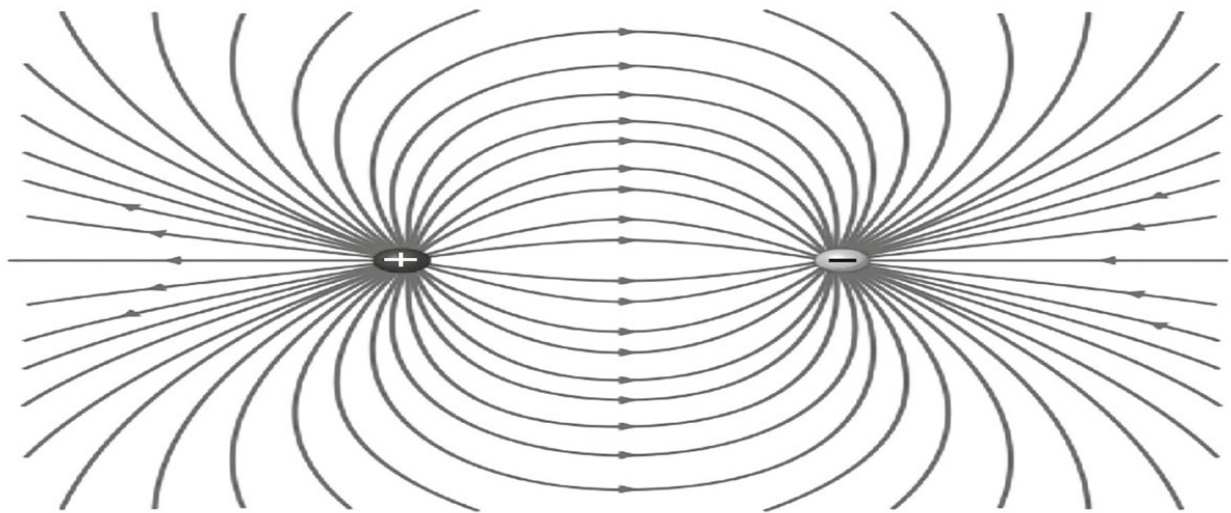


Figure 2.4. Le champ qui occupe l'espace et deux objets chargés électriquement avec lesquels le champ interagit. La force entre les deux objets est « portée » par les « lignes de force » du champ.

C'est une idée profondément différente de l'idée newtonienne de force qui agit à distance entre deux corps. Mais Newton l'aurait appréciée. Il était très réservé quant à cette action à distance qu'il avait

lui-même introduite. Comment la Terre peut-elle attirer la Lune, si éloignée ? Comment le Soleil peut-il attirer la Terre, sans la toucher ? Il avait écrit :

Il est inconcevable que de la matière brute, inanimée, puisse agir sur de la matière, à distance, sans un intermédiaire matériel⁶.

Et, plus loin, encore :

Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, en sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance au travers du vide, sans médiation d'autre chose [...] est pour moi une absurdité dont je crois qu'aucun homme, ayant la faculté de raisonner de façon compétente dans les matières philosophiques, puisse jamais se rendre coupable. La gravité doit être causée par un agent agissant constamment selon certaines lois ; mais que cet agent soit matériel ou immatériel, je l'ai laissé à la considération de mes lecteurs⁷.

Newton juge ici absurde son travail, célébré après lui comme le plus grand triomphe de la science ! Il devine que, derrière l'action à distance de sa force de gravité, intervient autre chose, mais il n'a pas idée de ce que cela peut être, et il laisse la question... « à la considération de [s]es lecteurs » !

C'est le propre du génie que d'être conscient des limites de ses résultats, fussent-ils aussi immenses que la découverte des lois de la mécanique et de la gravitation universelle. La théorie de Newton a tellement bien fonctionné, elle s'est révélée tellement utile que,

pendant deux siècles, personne ne s'est plus soucié de la remettre en question. Jusqu'à ce que Faraday, le « lecteur » à la considération duquel Newton avait laissé la question, trouve la clé pour comprendre comment font les corps pour s'attirer et se repousser à distance. Einstein appliquera ensuite la solution de Faraday à la gravitation de Newton.

En introduisant cette nouvelle entité, le « champ », Faraday sort résolument de l'élégante et simple ontologie newtonienne : le monde n'est plus seulement fait de particules qui se meuvent dans l'espace tandis que le temps s'écoule. Un nouvel élément intervient : le champ. Faraday est conscient de la portée du pas qu'il est en train d'accomplir. Son livre comporte de très belles pages où il s'interroge sur ces « lignes de force » et où il se demande s'il s'agit vraiment de réalités. Après des doutes et des considérations, il conclut qu'elles sont réelles, mais il propose cette conclusion avec « l'hésitation qui est nécessaire quand on affronte des questions au plus profond de la science⁸ ». Il est conscient qu'il est en train de modifier la structure du monde, après deux siècles de succès ininterrompus de la pensée newtonienne (figure 2.5).

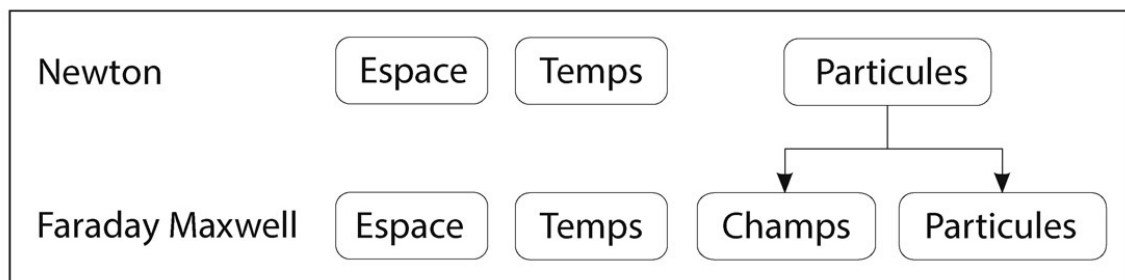


Figure 2.5. De quoi le monde est-il fait ?

Maxwell comprend vite que cette idée vaut de l'or. Il traduit alors l'intuition de Faraday, exprimée par des mots, en une page d'équations⁹. Ce sont les équations de Maxwell. Elles décrivent le comportement du champ électrique et du champ magnétique, donnant la version mathématique des « lignes de Faraday¹⁰ ».

Aujourd'hui, les équations de Maxwell sont utilisées quotidiennement pour décrire tous les phénomènes électriques et magnétiques, pour dessiner une antenne, une radio, un moteur électrique ou un ordinateur. On a ensuite découvert que ces mêmes équations permettent d'expliquer comment fonctionnent les atomes (maintenus ensemble par des forces électriques), pourquoi les particules de matière qui constituent un caillou sont liées les unes aux autres, comment fonctionne le Soleil et, de fait, une quantité étourdissante de phénomènes. Presque tout ce que nous voyons se produire, excepté la gravité et quelques autres phénomènes, est décrit par les équations de Maxwell.

Mais ce n'est pas tout. Il reste encore ce qu'on peut regarder peut-être comme la plus belle découverte scientifique de tous les temps : ces mêmes équations expliquent la lumière.

Les équations de Maxwell prévoient que les lignes de Faraday peuvent vibrer et onduler comme des vagues. Les ondulations des lignes de Faraday se déplacent à une vitesse que Maxwell calcule et qui se révèle être... exactement la même que la vitesse de la lumière ! Qu'est-ce que cela signifie ? Que la lumière n'est pas autre chose qu'une vibration des lignes de Faraday ! Non seulement Faraday et Maxwell ont compris comment fonctionnent l'électricité et le magnétisme mais, en même temps, comme effet collatéral, ils ont compris ce qu'est la lumière !

Le monde autour de nous est coloré. Qu'est-ce que la couleur ? C'est la fréquence (la vitesse d'oscillation) des ondes

électromagnétiques qui constituent la lumière. Si les ondes vibrent un peu plus vite, la lumière est plus bleue. Si elles vibrent un peu plus lentement, la lumière est plus rouge. La couleur telle que nous la voyons, nous, est notre réaction psychophysique aux signaux nerveux qui viennent des récepteurs oculaires, capables de distinguer des ondes électromagnétiques de différentes fréquences.

Qu'a bien pu éprouver Maxwell, quand il s'est rendu compte que ses équations, destinées à décrire des forces entre des bobines, des circuits et des aimants du laboratoire de Faraday, expliquaient la lumière et les couleurs ?

La lumière n'est qu'une vibration rapide de la toile d'araignée des lignes de Faraday, qui se ride comme la surface d'un lac sous l'effet du vent. Il n'est donc pas vrai que « nous ne voyons pas » les lignes de Faraday. Nous voyons *seulement* des lignes de Faraday qui vibrent. « Voir » veut dire percevoir la lumière, et la lumière est le mouvement des lignes de Faraday. Rien ne va d'un lieu à un autre de l'espace sans que quelque chose le transporte. Si nous voyons un enfant jouer sur la plage, c'est seulement parce qu'un lacs de lignes vibrantes véhicule jusqu'à nous son image. Le monde n'est-il pas merveilleux ?

Cette découverte est extraordinaire, mais il y a plus encore. La découverte suivante a une valeur concrète pour l'humanité, une valeur sans égale. Maxwell se rend compte que les équations prévoient que les lignes de Faraday peuvent vibrer aussi à des fréquences bien plus basses que celles de la lumière. Il doit exister d'*autres* ondes, que personne n'a encore jamais vues, qui sont produites par le mouvement des charges électriques, et qui induisent à leur tour des mouvements d'autres charges électriques. Il doit donc être possible d'agiter une charge électrique *ici* et de produire une onde qui mettra en mouvement une charge électrique *là*. Quelques années plus tard seulement, ces ondes, prévues théoriquement par Maxwell, seront révélées (par le

physicien allemand Heinrich Hertz) ; quelques années plus tard encore, Marconi construira à partir d'elles la première radio.

Toute la technologie moderne des communications – radio, télévision, téléphones, ordinateurs, navigateurs satellites, wi-fi, le réseau Internet, etc. – est une application de la prévision de Maxwell ; les équations de Maxwell servent de base à tous les calculs des ingénieurs des communications. Toute la civilisation contemporaine, fondée sur la rapidité des communications, naît de l'intuition d'un humble relieur de livres de Londres – habile à expérimenter et doué d'une vive imagination – qui a vu des lignes avec l'œil de l'esprit, et d'un bon mathématicien qui a traduit tout cela en équations et qui a compris que les ondes sur ces lignes peuvent transporter des nouvelles en un éclair d'un bout à l'autre de la planète.

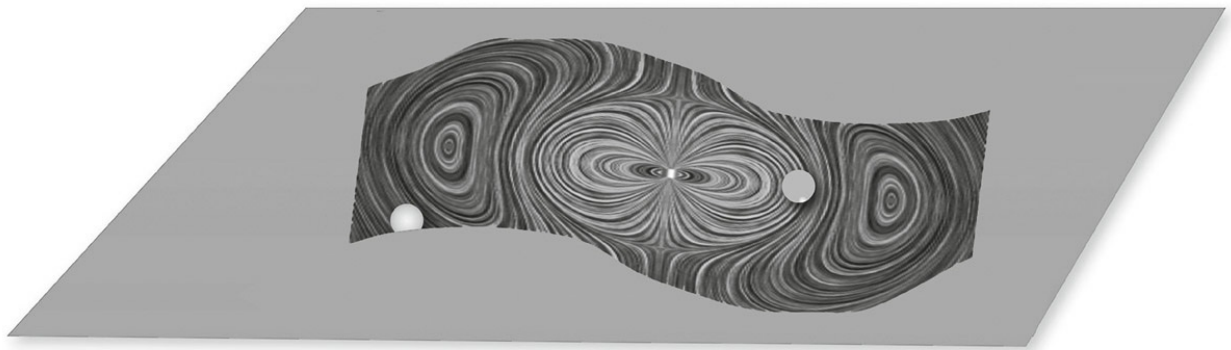


Figure 2.6. Le monde de Faraday et de Maxwell : des particules qui se meuvent dans l'espace, au cours du temps.

Toute la technologie actuelle est fondée sur l'utilisation d'un objet physique – les ondes électromagnétiques – qui n'a pas été « découvert » : il a d'abord été « prédit » de façon mathématique par Maxwell, lequel a simplement trouvé la bonne description

mathématique permettant de rendre compte de l'intuition avec laquelle Faraday avait mis de l'ordre dans ses propres observations avec des bobines et des aimants. Telle est la force extraordinaire de la physique théorique.

Le monde a changé : il n'est plus fait de particules dans l'espace, mais de particules et de champs qui se déplacent dans l'espace (figure 2.6). Ce changement paraît modeste mais, quelques décennies plus tard, un jeune juif, citoyen du monde, va en tirer des conséquences qui iront bien au-delà de l'imagination pourtant bouillonnante de Michael Faraday, et qui bouleverseront de fond en comble le monde de Newton.

1. La mauvaise réputation de la physique aristotélicienne remonte aux polémiques de Galilée, qui dut la critiquer pour progresser. Polémiste comme il l'était, il l'attaqua bille en tête et avec ironie.

2. Jamblique de Chalcis, *Summa pitagorica*.

3. Le carré de la période de révolution est proportionnel au cube du rayon de l'orbite. Cette loi s'était révélée exacte non seulement pour les planètes autour du Soleil (Kepler), mais également pour les satellites de Jupiter (Huygens). Newton pense, par induction, qu'elle devrait valoir aussi pour les hypothétiques lunes de la Terre. La constante de proportionnalité dépend du corps autour duquel on tourne.

4. I. Newton, *Opticks*, 1704 (tr. fr. *L'Optique de Newton dans la traduction de Jean-Paul Marat* (1787), Bourgois, 1989).

5. L'énergie libérée par les moteurs à explosion est chimique et donc, en dernière analyse, électromagnétique.

6. I. Newton, *Letters to Bentley*, Kessinger (MT), 2010. Cité in H. S. Thayer, *Newton's Philosophy of Nature*, Hafner, 1953, p. 54.

7. *Ibid.*

8. M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, Bernard Quaritch, 1839-1855, 3 vol., p. 436-437.

9. Les équations occupent une page dans le traité originel de Maxwell. Elles tiennent aujourd'hui en une demi-ligne : $dF = 0$, $d^*F = J$. Nous verrons bientôt pourquoi.

10. Si vous visualisez le champ comme un vecteur (une petite flèche) en chaque point de l'espace, cette petite flèche est la direction de la ligne de Faraday en ce point, c'est-à-dire la tangente à cette ligne, et la longueur de la petite flèche est proportionnelle à la densité des lignes de Faraday en ce point.

DEUXIÈME PARTIE

LE DÉBUT
DE LA RÉVOLUTION



La physique du xx^e siècle a modifié en profondeur l'image newtonienne du monde. L'efficacité de ces modifications est aujourd'hui largement démontrée et elle a déterminé de nombreuses technologies. Cet approfondissement substantiel de notre compréhension du monde se fonde sur deux grandes théories : la relativité générale et la mécanique quantique.

Toutes deux nous demandent une courageuse remise en cause de nos idées conventionnelles sur le monde. L'espace et le temps en ce qui concerne la relativité, la matière et l'énergie pour ce qui relève des quanta.

Dans cette partie, je vais illustrer en détail les deux théories, en essayant d'expliquer leur sens physique et d'en mettre en lumière la portée conceptuelle révolutionnaire. Ici commence la magie de la physique du xx^e siècle. Étudier ces théories et chercher à les comprendre est une aventure passionnante.

Ces deux théories sont la base dont on part aujourd'hui pour rechercher la fameuse gravité quantique. C'est à partir de ces deux piliers, relativité et quanta, qu'on tentera de progresser.

CHAPITRE 3

Albert

Le père d'Albert Einstein vendait des centrales électriques en Italie. Au temps où Albert était un jeune adolescent, les équations de Maxwell n'avaient été écrites que depuis deux décennies, mais en Italie c'était déjà le début de la révolution industrielle, et les turbines et les transformateurs que commercialisait son père étaient tous fondés sur ces équations. La nouvelle physique montrait ses muscles...

Albert avait un caractère rebelle. Ses parents l'avaient mis au lycée en Allemagne, mais il trouvait pour sa part l'école allemande trop rigide, obtuse et martiale ; entré en conflit avec l'autorité scolaire, il avait abandonné ses études et suivi ses parents en Italie, à Pavie, passant son temps à baguenauder. Les parents comprennent rarement que la flânerie des adolescents est le temps le mieux employé dans l'absolu. Puis il était allé étudier en Suisse, sans d'abord parvenir à intégrer l'École polytechnique de Zurich, comme il l'aurait voulu. Au terme de ses études, il n'avait pas réussi à décrocher un poste à l'université ; aussi, pour pouvoir vivre avec la femme qu'il aimait, avait-il dû trouver un emploi au bureau des brevets de Berne.

Ce n'était pas un métier très gratifiant pour un docteur en physique à l'époque, mais cela laissait à Albert du temps pour penser et pour

travailler. D'ailleurs, c'est ce qu'il faisait depuis l'adolescence : au lieu de s'occuper de ce qu'on lui enseignait à l'école, il lisait les *Éléments* d'Euclide et la *Critique de la raison pure* de Kant.

À 25 ans, Einstein rédige trois articles qu'il envoie aux *Annalen der Physik*. Chacun des trois aurait mérité un Nobel. Chacun des trois est un pilier absolu de notre compréhension actuelle du monde. J'ai déjà parlé du premier article : le jeune Albert y calcule la dimension des atomes et prouve, vingt-trois siècles plus tard, l'exactitude des idées de Démocrite : la matière est bien constituée d'atomes.

Le deuxième article est celui pour lequel Einstein est le plus connu : l'article par lequel il introduit la théorie de la relativité, et c'est à la théorie de la relativité que ce chapitre est consacré.

À vrai dire, on compte deux théories de la relativité. L'enveloppe qu'a envoyée Einstein à 25 ans contenait la présentation de la première : la théorie qu'on appelle aujourd'hui « relativité restreinte ». La relativité restreinte est un éclaircissement important de la structure de l'espace et du temps, que je vais illustrer avant de passer à la plus grande théorie d'Einstein : la relativité générale.

La relativité restreinte est subtile et conceptuellement difficile. Je crois même qu'elle est plus difficile à assimiler que la relativité générale. Que le lecteur ne se décourage pas si le prochain petit chapitre lui semble un peu difficile. Les notions qu'il introduit montrent, pour la première fois, que dans la vision newtonienne du monde il n'y a pas seulement quelque chose qui manque ; il y a aussi quelque chose qui, si nous voulons comprendre le monde, doit être modifié radicalement, et d'une manière qui va à l'encontre de nos habitudes de pensée. C'est le premier vrai plongeon dans la modification des conceptions les plus intuitives.

Le présent étendu

Les théories de Newton et de Maxwell semblent montrer de subtiles contradictions entre elles. Les équations de Maxwell déterminent une vitesse : la vitesse de la lumière. Mais la mécanique de Newton n'est pas compatible avec l'existence d'une vitesse fixe, car ce qui entre dans les équations de Newton c'est toujours l'accélération et non la vitesse. Dans la physique de Newton, la vitesse est toujours vitesse d'un objet par rapport à un autre. C'est Galilée qui avait souligné le fait que la Terre peut se mouvoir sans même que nous nous en apercevions, car ce que nous appelons vitesse, c'est toujours une vitesse « par rapport à la Terre ». La vitesse, dit-on, est un concept *relatif*. La vitesse d'un objet n'existe pas en soi. Voilà ce qu'on enseignait aux étudiants en physique au XIX^e siècle. Mais, s'il en est ainsi, la vitesse de la lumière que déterminent les équations de Maxwell est vitesse par rapport à quoi ?

Une possibilité, c'est qu'il y ait une espèce de substrat universel par rapport auquel la lumière se déplace à cette vitesse. Mais, concrètement, on ne comprend pas quels effets aurait alors ce substrat, car, quoi qu'il en soit, les prévisions de la théorie de Maxwell semblent indépendantes de lui. En particulier, les tentatives expérimentales, effectuées à la fin du XIX^e siècle, d'utiliser la lumière pour mesurer la vitesse de la Terre dans l'espace par rapport à cet hypothétique substrat ont toutes échoué.

Einstein a affirmé que ce ne sont pas des expérimentations particulières qui l'ont mis sur la bonne voie pour résoudre cette énigme mais, plus simplement, le fait de réfléchir sur la relation entre les équations de Maxwell et la mécanique de Newton, et de se demander si, après tout, la théorie de Maxwell ne pouvait pas être cohérente avec le cœur des découvertes de Newton et de Galilée, c'est-à-dire le fait que la vitesse est une notion relative.

En partant de considérations de ce genre, Einstein arrive à une découverte stupéfiante. Pour comprendre de quoi il s'agit, cher lecteur, pense à tous les faits passés, présents et futurs par rapport au moment où tu es en train de lire, et imagine-les disposés comme à la [figure 3.1](#).

Eh bien, la découverte d'Einstein est que ce dessin est erroné. En réalité, les choses sont comme le montre la [figure 3.2](#).

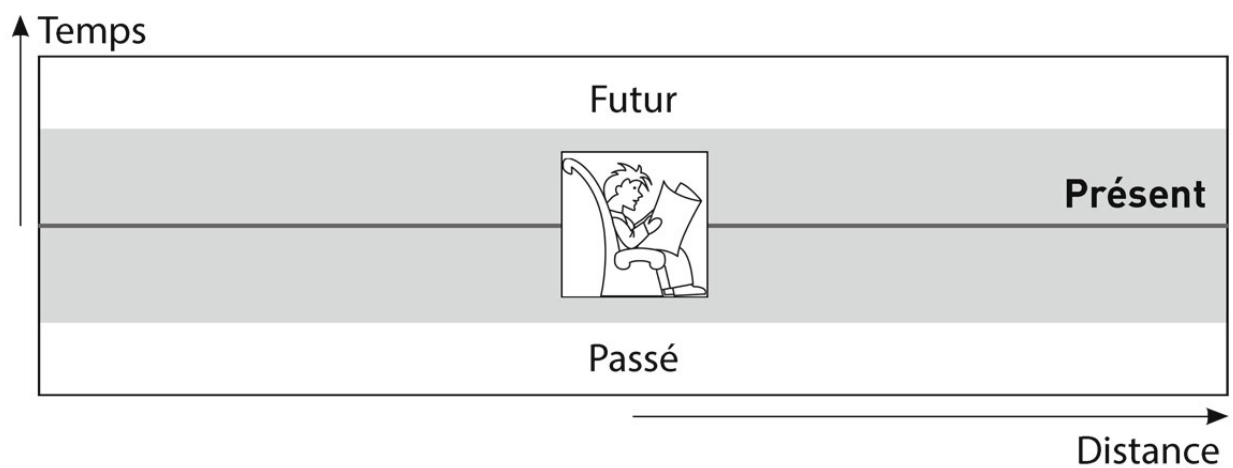


Figure 3.1. Espace et temps avant Einstein.

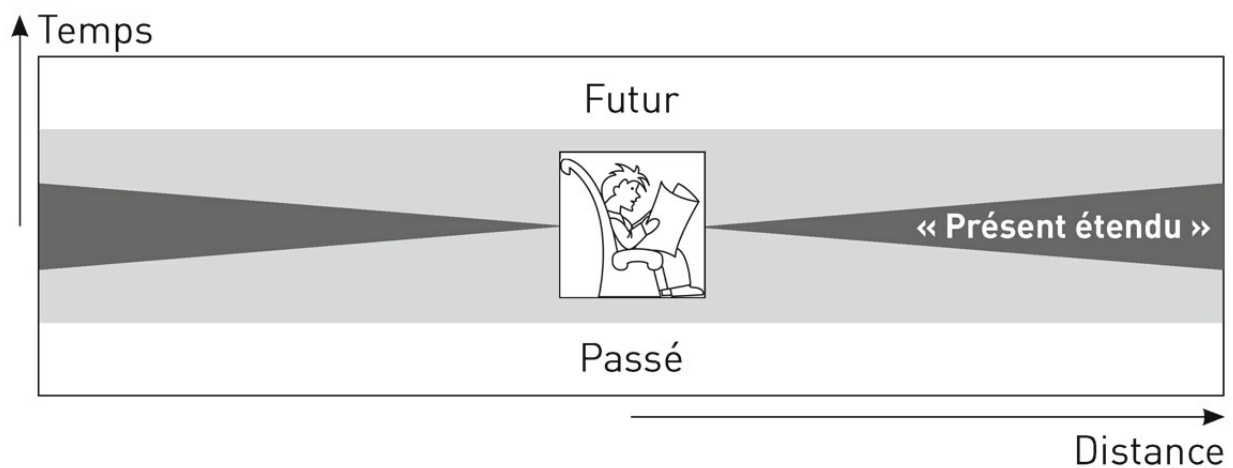


Figure 3.2. La structure de l'« espace-temps ». Pour chaque observateur, le « présent étendu » est la zone intermédiaire entre le passé et le futur.

Entre le passé et le futur de chaque événement (par exemple, entre le passé et le futur pour toi, là où tu es, et au moment précis où tu es à présent en train de lire), il existe une « zone intermédiaire », un « présent étendu », une zone qui n'est ni passée ni future. Telle est la théorie de la relativité restreinte.

La durée de cette « zone intermédiaire¹ », qui n'est ni passée ni future par rapport à toi à présent, est très petite et dépend de la distance par rapport à toi, comme le montre la [figure 3.2](#) : plus elle est éloignée de toi, plus longue est sa durée. À 2 mètres de distance de ton nez, lecteur, la durée de ce qui est pour toi la « zone intermédiaire », ni passée ni future, est de quelques nanosecondes, c'est-à-dire d'un milliardième de seconde : un rien. Bien moins que ce que nous pouvons percevoir (le nombre de nanosecondes que comprend une seconde est égal au nombre de secondes que l'on compte en trente ans). De l'autre côté de l'océan par rapport à toi, la durée de cette « zone intermédiaire » est un millième de seconde, bien loin encore de notre seuil de perception du temps, c'est-à-dire du temps minimal que nous parvenons à distinguer grâce à nos sens, qui est de l'ordre de quelques dixièmes de seconde. Mais, sur la Lune, la durée du présent étendu est de quelques secondes et, sur Mars, d'un quart d'heure. Cela signifie que nous pouvons dire que sur Mars il y a des événements qui, en ce moment précis, se sont déjà produits, d'autres qui doivent encore se produire, mais aussi un quart d'heure durant lequel se produisent des événements qui pour nous ne sont ni passés ni futurs.

Ils sont quelque chose d'autre. De ce quelque chose d'autre, nous ne nous étions jamais aperçus auparavant, parce que, tout près de nous,

ce quelque chose d'autre dure trop peu, et que nous ne sommes pas assez mentalement vifs pour le remarquer. Mais il existe bel et bien.

C'est pour cela qu'il n'est pas possible d'avoir une conversation satisfaisante avec Mars. Si je suis sur Mars alors que tu es ici, je te pose une question, tu me réponds dès que tu entends ce que je t'ai dit, et ta réponse me parvient un quart d'heure après que je t'ai posé la question. Ce quart d'heure pour moi est du temps qui n'est ni du passé ni du futur par rapport au moment où tu m'as répondu. Le point clé, qu'a compris Einstein, est que ce quart d'heure est inéluctable : impossible de le réduire. Il est inscrit dans la structure de l'espace et du temps : on ne peut pas le réduire, de la même façon qu'on ne peut pas envoyer une lettre dans le passé.

C'est bizarre, mais c'est comme ça. De même qu'il est bizarre qu'à Sydney les gens vivent la tête en bas par rapport à nous, mais c'est comme ça. Puis on s'y habitue et tout devient normal et tout à fait sensé. La structure de l'espace et du temps est ainsi faite.

Cela implique qu'on ne peut pas dire d'un événement qui se produit sur Mars qu'il est effectivement en train de se produire « précisément maintenant », parce qu'il n'existe pas de « précisément maintenant » ([figure 3.3](#))². En termes techniques, on dit qu'Einstein a compris que la « simultanéité absolue » n'existe pas : il n'existe pas un ensemble d'événements dans l'Univers qui existent tous maintenant. Notre « maintenant » n'existe qu'ici. L'ensemble des événements de l'Univers ne peut pas être décrit correctement comme une succession de présents, l'un suivant l'autre ; il a une structure plus complexe, comme le montre la [figure 3.2](#). La figure décrit ce qu'en physique on appelle « espace-temps » : l'ensemble du passé et du futur par rapport à un événement, mais également de ce qui n'est « ni-passé-ni-futur », qui n'est pas un instant, mais qui a une durée.

Dans la galaxie d'Andromède, la durée de ce « présent étendu » par rapport à nous est de deux millions d'années. Tout ce qui se produit durant ces deux millions d'années n'est ni passé ni futur par rapport à nous. Si sur Andromède vivait une civilisation avancée et amicale qui, à un moment donné, décidait d'envoyer une flotte de vaisseaux spatiaux pour nous rendre visite, se demander maintenant si la flotte est déjà partie ou pas encore n'aurait aucun sens. La seule question sensée à se poser serait de savoir quand nous pourrions recevoir le premier signal de cette flotte.

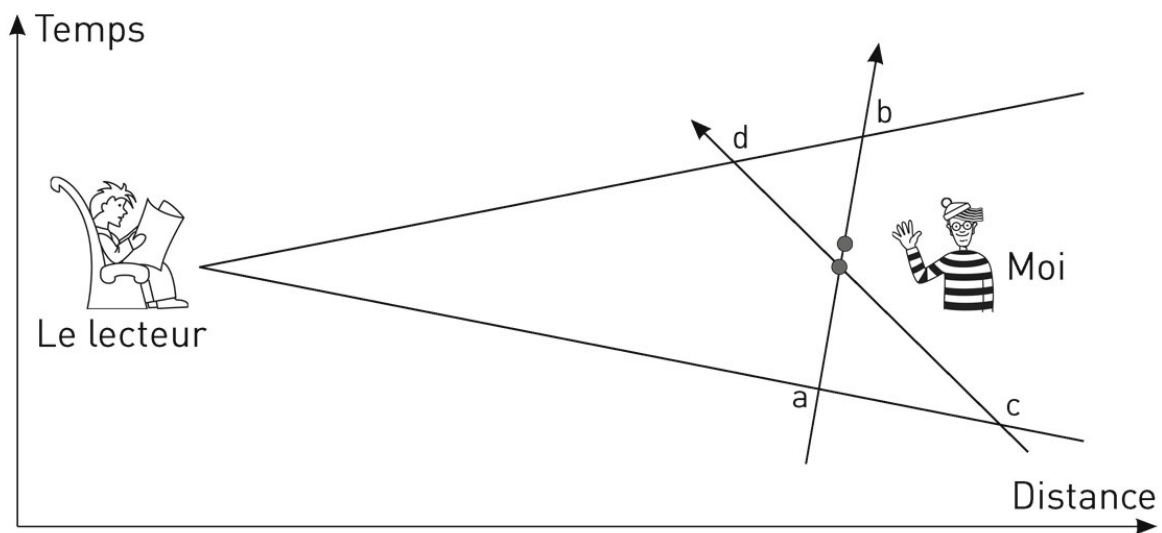


Figure 3.3. La relativité de la simultanéité.

Quelles conséquences concrètes a la découverte de cette structure de l'espace-temps par le jeune Einstein en 1905 ? Des conséquences directes pour notre vie quotidienne, pratiquement aucune. Mais des conséquences indirectes, oui, et lourdes. Le fait que l'espace et le temps soient intimement liés, comme le montre la [figure 3.2](#), implique une réécriture subtile et complète de la mécanique de Newton, qu'Einstein

met au point rapidement en 1905 et 1906. Un premier résultat de cette réécriture est seulement formel : de même que l'espace et le temps se fondent en un concept unique d'espace-temps, de même, dans la nouvelle mécanique, le champ électrique et le champ magnétique se fondent en un concept unique que nous appelons aujourd'hui champ électromagnétique. Les équations complexes écrites par Maxwell pour les deux champs deviennent très simples une fois écrites dans ce nouveau langage.

Mais le résultat, lourd de conséquences, est autre. De même que le temps et l'espace, ou que les champs électrique et magnétique, dans la nouvelle mécanique se fondent également les concepts d'*énergie* et de *masse*. Avant 1905, il semblait certain que *deux* principes généraux valaient dans la nature : la conservation de la masse et la conservation de l'énergie. La conservation de la masse avait été constatée par les chimistes dans toutes les réactions chimiques. La conservation de l'énergie découlait directement des équations de Newton, et elle était considérée comme une des lois les plus générales et les plus immuables. Mais Einstein comprend que l'énergie et la masse ne sont que les deux faces de la même entité, comme le champ électrique et le champ magnétique sont les deux faces du même champ, et comme l'espace et le temps sont deux aspects du même et unique espace-temps. Et il comprend que la masse, toute seule, ne se conserve pas, et que l'énergie – telle qu'on la concevait à l'époque – ne se conserve pas seule. L'une peut se transformer en l'autre : il existe *une seule* loi de conservation, non deux. Ce qui se conserve, c'est la somme de la masse et de l'énergie, et non chacune d'elles séparément. Autrement dit : il doit exister des processus qui transforment l'énergie en masse, ou la masse en énergie.

Un rapide calcul permet à Einstein de déterminer combien d'énergie on obtient en transformant un gramme de masse. Le résultat,

donné par la célèbre formule $E = mc^2$, est important : l'énergie en laquelle se transforme un gramme de matière est énorme : elle vaut celle de millions de bombes nucléaires explosant en même temps ; c'est une énergie suffisante pour éclairer les villes et faire tourner les industries d'un pays pendant des mois... ou pour détruire en une seconde des centaines de milliers d'êtres humains dans une ville comme Hiroshima.

Les spéculations théoriques du jeune Einstein avaient conduit l'humanité vers une ère nouvelle : celle de l'énergie nucléaire. Une ère de nouvelles possibilités... et de nouveaux dangers. Aujourd'hui, grâce à l'intelligence d'un jeune homme rebelle et insoumis aux règles, nous pouvons éclairer les habitations des dix milliards d'êtres humains qui peupleront bientôt cette planète. Nous pouvons voyager dans l'espace vers d'autres étoiles. Ou nous détruire les uns les autres et dévaster cette même planète. Cela dépend des choix que nous voudrions faire et des gouvernants que nous mettrons au pouvoir.

Aujourd'hui, la structure de l'espace-temps telle que l'a comprise Einstein a été étudiée à fond et testée maintes fois en laboratoire, et elle est considérée comme acquise. Le temps et l'espace sont un peu différents de ce qu'on pensait depuis Newton. La différence est que l'espace n'existe pas tout seul. Dans l'espace étendu de la [figure 3.2](#), il n'y a pas une « tranche » particulière qui ait plus le droit que d'autres à être appelée l'« espace maintenant ». Notre idée intuitive de « présent », l'ensemble de toutes les choses qui sont en train de se produire maintenant dans l'Univers, est l'effet de notre cécité, de notre incapacité à percevoir de petits intervalles de temps.

Le présent est comme la planéité de la Terre : nous avons pu imaginer que la Terre était plate seulement parce que, à cause du caractère limité de nos sens et de notre capacité de mouvement, nous ne voyions pas beaucoup plus loin que le bout de notre nez. Si nous

avons vécu sur un astéroïde de 1 kilomètre de diamètre, nous nous serions tout de suite rendu compte que nous étions sur une sphère. Si notre cerveau et nos sens avaient été plus fins, et si nous avions distingué aisément des temps de l'ordre de la nanoseconde, nous ne serions jamais arrivés à concevoir l'idée d'un « présent » étendu partout et nous aurions très vite reconnu qu'entre le passé et le futur existe cette zone intermédiaire. Nous nous serions rendu compte que dire « ici et maintenant » a du sens, mais que dire « maintenant » pour désigner des faits qui « sont en train de se produire à présent » dans tout l'Univers n'en a aucun. C'est comme si nous nous demandions si notre galaxie est plus haut ou plus bas que la galaxie d'Andromède : voilà une question dénuée de sens, car plus haut ou plus bas n'a de sens que pour deux objets à la surface de la Terre, pas pour deux objets arbitraires dans l'Univers. Il n'y a pas toujours un plus haut et un plus bas entre deux objets quelconques dans l'Univers. Il n'y a pas toujours un avant et un après entre deux événements quelconques qui se produisent dans l'Univers.

Lorsque les *Annalen der Physik* ont publié l'article d'Einstein, cela a fait forte impression sur le monde de la physique. Les apparentes contradictions entre les équations de Maxwell et la physique newtonienne étaient bien connues et personne ne savait comment les résoudre. La solution d'Einstein, stupéfiante et très élégante, a pris tout le monde de court. On raconte que, dans la pénombre des vieilles salles de l'Université de Cracovie, un austère professeur de physique est sorti de son bureau en agitant l'article d'Einstein et en s'écriant : « Le nouvel Archimède est né ! »

Malgré le tollé provoqué par ce pas qu'a accompli Einstein en 1905 en introduisant la relativité restreinte, il ne s'agit cependant pas de son plus grand triomphe. Le vrai chef-d'œuvre d'Einstein est sa seconde

théorie de la relativité, la théorie de la *relativité générale*, publiée dix ans plus tard par un Einstein de 35 ans.

La relativité générale est la plus belle théorie physique de tous les temps, le premier des deux piliers de la gravité quantique, et elle est au cœur de ce livre. Ici, cher lecteur, commence la vraie, la grande magie de la nouvelle physique du xx^e siècle.

La plus belle des théories

Devenu un physicien renommé après avoir publié la théorie de la relativité restreinte, Einstein avait reçu des propositions de travail de plusieurs universités. Mais quelque chose le troublait : la relativité restreinte ne s'accorde pas avec ce que nous savons sur la gravité. Il s'en aperçoit en écrivant un article de synthèse sur sa théorie, et il se demande si la vieille « gravitation universelle » du père Newton ne devrait pas être revue elle aussi, afin de devenir compatible avec la nouvelle relativité.

L'origine du problème est très simple à comprendre : Newton avait essayé d'expliquer pourquoi les objets tombent et les planètes tournent. Il avait imaginé une force qui attire tous les corps les uns vers les autres : la force de gravité. Comment cette force pouvait attirer les objets à distance, sans intermédiaire, on ne le savait pas : Newton lui-même, nous l'avons vu, avait soupçonné que, dans l'idée d'une force agissant à distance entre des corps qui ne se touchent pas, il y avait quelque chose d'incomplet et que, afin que la Terre attire la Lune, il fallait entre les deux un milieu pour transmettre la force. La solution avait été trouvée par Faraday deux cents ans plus tard, non pour la force de gravité, mais pour les forces électrique et magnétique, en

découvrant l'existence des champs. Le champ électrique et le champ magnétique « transportent » les forces électrique et magnétique.

Il est clair, à ce stade, pour toute personne raisonnable, que la force de gravité doit avoir elle aussi ses lignes de champ. Et, par analogie, que la force d'attraction entre le Soleil et la Terre, et entre la Terre et les objets qui tombent, doit être elle aussi attribuée à un champ, cette fois un champ gravitationnel. La solution trouvée par Faraday et Maxwell à la question concernant ce qui transporte la force doit s'appliquer non seulement à l'électricité, mais aussi à la vieille force de gravité. Il doit donc exister un champ gravitationnel et des équations, analogues à celles de Maxwell, capables de décrire comment se comportent les lignes de champ gravitationnelles. Dans les premières années du siècle, cela était clair pour toutes les personnes suffisamment raisonnables, c'est-à-dire pour le seul Albert Einstein.

Einstein, fasciné depuis son adolescence par le champ électromagnétique qui faisait tourner les rotors des centrales électriques construites par son père, se met à chercher de quoi peut bien être fait le champ gravitationnel, et quelles équations pourraient le décrire. Il se plonge dans le problème, qu'il lui faudra dix ans pour résoudre. Dix ans de travaux fous, d'essais, d'impasses, de confusions, d'idées fulgurantes, d'erreurs et de stress. Finalement, en novembre 1915, il donne à l'imprimerie un article avec la solution complète : une nouvelle théorie de la gravité, qu'il nomme « théorie de la relativité générale », son chef-d'œuvre. C'est Lev Landau, le plus grand physicien théoricien d'URSS, qui l'appelle « la plus belle des théories ».

La raison de la beauté de la théorie n'est pas difficile à deviner. Au lieu d'essayer simplement d'inventer la forme mathématique du champ gravitationnel et d'en deviner les équations, Einstein reprend une autre grande question irrésolue, au cœur de la théorie de Newton.

Newton était revenu à l'idée de Démocrite selon laquelle les corps se meuvent dans l'espace. L'espace devait être un grand conteneur vide, une grande boîte rigide pour l'Univers, un immense quadrillage où les objets se déplacent tout droit, jusqu'à ce qu'une force les fasse dévier. Mais de quoi cet espace, ce conteneur du monde, est-il fait ? Qu'est-ce que l'espace ?

Pour nous, l'idée d'espace paraît assez simple, mais c'est surtout l'accoutumance à la physique newtonienne qui nous la fait paraître telle. Si vous y réfléchissez bien, l'espace vide ne fait pas partie de notre expérience. D'Aristote à Descartes, c'est-à-dire pendant deux mille ans, l'idée démocritéenne d'un espace comme entité différente, distincte des choses, n'avait jamais été acceptée comme raisonnable. Pour Aristote, comme pour Descartes, les choses sont étendues, mais l'extension est une propriété des choses : il n'existe pas d'extension sans chose étendue. Je peux vider l'eau d'un verre, mais il y entrera de l'air. Avez-vous jamais vu un verre vraiment vide ?

Si, entre deux choses, il n'y a *rien*, raisonnait Aristote, alors il n'y a rien. Comment se peut-il qu'il n'y ait rien et qu'en même temps il y ait quelque chose : l'espace ? Quel est cet « espace vide » au sein duquel se meuvent les particules ? Est-ce quelque chose ou rien ? Si ce n'est rien, ce n'est pas, c'est inévitable. Si c'est quelque chose, est-il possible que l'unique propriété que cela ait soit d'être là à ne rien faire ?

Dès l'Antiquité, l'idée d'un espace vide, à mi-chemin entre une chose et une non-chose, avait troublé les penseurs. Démocrite, qui avait posé l'espace vide à la base de son monde, où se meuvent les atomes, n'avait assurément pas été d'une clarté cristalline sur cette question : il avait dit que son espace était quelque chose « entre l'être et le non-être » : « Démocrite postule le plein et le vide comme principes, appelant l'un "Être" et l'autre "Non-Être"³. » Un non-être qui cependant est. Difficile d'être plus obscur.

Newton, qui avait ressuscité l'espace démocritéen, avait essayé de rapiécer l'affaire en disant que l'espace était le *sensorium* de Dieu. Mais personne, et peut-être même pas lui, n'a jamais bien compris ce qu'il entendait par *sensorium* de Dieu. Il est certain que pour Einstein, qui accordait peu de crédit à un Dieu, avec ou sans *sensorium*, si ce n'est pour l'utiliser dans de belles phrases à effet, l'explication n'était absolument pas convaincante.

Pour nous, l'idée newtonienne d'espace est devenue familière ; mais, comme en d'autres temps l'idée d'une Terre ronde, elle avait déconcerté beaucoup de gens. Newton avait eu du mal à vaincre la résistance à son idée de ressusciter la conception démocritéenne de l'espace ; au début, personne ne le prenait au sérieux. Seule l'extraordinaire efficacité de ses équations, qui prédisaient toujours la chose exacte, avait fini par faire taire les critiques. Mais les doutes des philosophes sur le caractère raisonnable de la notion newtonienne d'espace persistaient, et Einstein, qui lisait volontiers les philosophes, en était conscient. Un philosophe a beaucoup insisté sur les difficultés conceptuelles de la conception newtonienne d'espace, dont l'influence a été largement reconnue par Einstein : Ernst Mach, celui-là même qui ne croyait pas aux atomes. Comme quoi on peut être myope sur quelque chose et voir très loin sur autre chose.

Einstein recueille ainsi non pas un, mais deux problèmes. Le premier : comment décrire le champ gravitationnel ? Le second : qu'est-ce que l'espace de Newton ?

Et voilà l'extraordinaire coup de génie d'Einstein, un des plus grands coups d'aile dans la pensée de l'humanité : et si le champ gravitationnel était l'espace de Newton, qui nous paraît si mystérieux ? Et si l'espace de Newton était tout bonnement le champ gravitationnel ?

Cette idée, simple, splendide, fulgurante, c'est la théorie de la relativité générale.

Le monde n'est pas fait d'espace + des particules + un champ électromagnétique + un champ gravitationnel. Le monde est fait seulement de particules et de champs, c'est tout, nul besoin d'ajouter l'espace. L'espace de Newton *est* le champ gravitationnel. Ou, *vice versa*, ce qui revient au même, le champ gravitationnel *est* l'espace (figure 3.4).

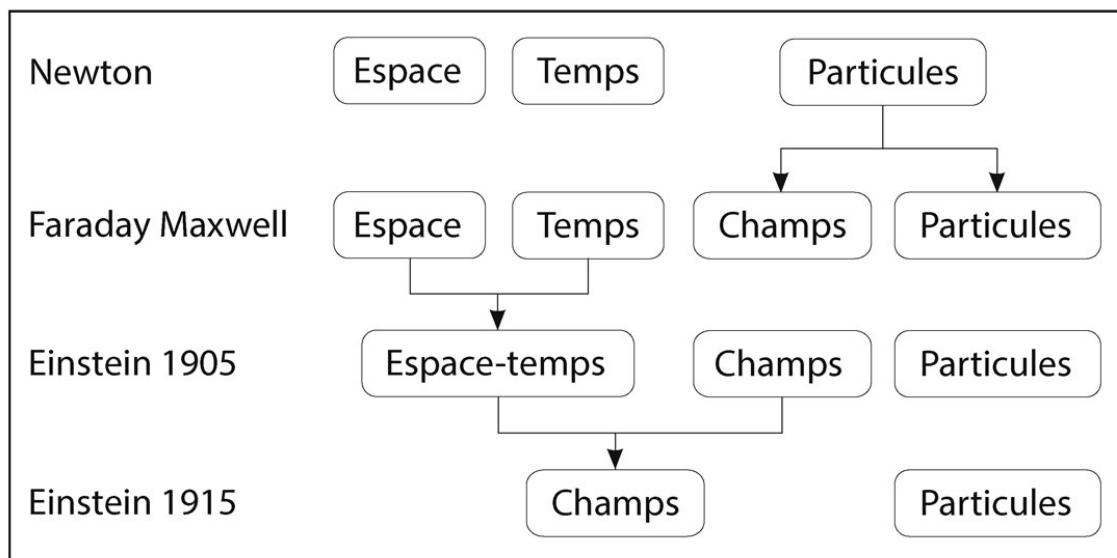


Figure 3.4. De quoi le monde est-il fait ?

Sauf que, contrairement à l'espace de Newton, qui est plat et fixe, le champ gravitationnel, en tant que champ, est quelque chose de mouvant, d'ondulant, et sujet à des équations – comme le champ de Maxwell, comme les lignes de Faraday.

C'est une simplification impressionnante du monde. L'espace n'est plus différent de la matière. C'est une des composantes « matérielles »

du monde, c'est le frère du champ électromagnétique. C'est une entité réelle, capable d'onduler, de s'incurver, de se tordre.

Nous ne vivons pas au sein d'un invisible quadrillage rigide : nous sommes plutôt plongés dans un gigantesque mollusque flexible (la métaphore est d'Einstein). Le Soleil courbe l'espace autour de lui, et la Terre ne tourne pas autour de lui parce qu'elle serait attirée par une mystérieuse force à distance, mais parce qu'elle va tout droit dans un espace courbe. Comme une bille qui roule dans un entonnoir : il n'y a pas de forces mystérieuses engendrées par le centre de l'entonnoir, c'est la nature courbe des parois qui fait rouler la bille. Les planètes tournent autour du Soleil et les choses tombent parce que l'espace est incurvé autour d'eux ([figure 3.5](#)).

Un peu plus précisément, ce qui s'incurve, ce n'est pas l'espace, mais l'espace-temps, dont dix ans auparavant Einstein avait montré qu'il était un tout structuré, et non une succession de tranches temporelles.

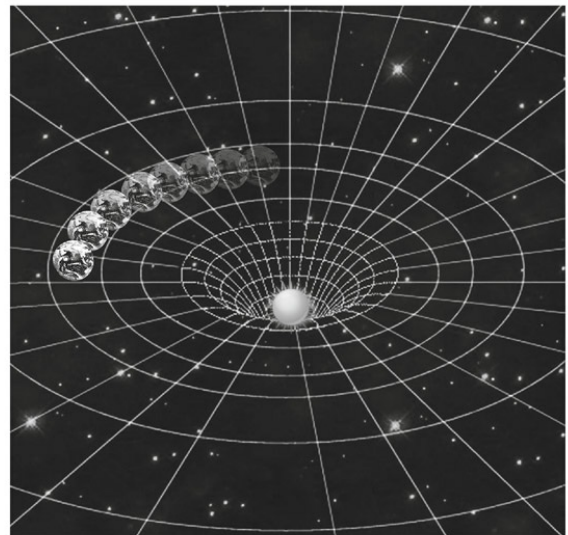


Figure 3.5. La Terre tourne autour du Soleil parce que l'espace-temps autour du Soleil est courbe. Un peu comme une bille roulant sur les parois incurvées d'un entonnoir.

Voilà l'idée. Le problème d'Einstein était seulement de trouver les équations pour la rendre concrète. Comment décrire cette courbure de l'espace-temps ?

Le plus grand mathématicien du XIX^e siècle, Carl Friedrich Gauss, le « prince des mathématiciens », avait décrit les surfaces courbes bidimensionnelles, comme la surface des collines ou comme celle représentée par la [figure 3.6](#).

Ensuite, il avait demandé à un de ses bons étudiants de généraliser le tout en espaces courbes à trois dimensions, ou plus. L'étudiant, Bernhard Riemann, avait produit une volumineuse thèse de doctorat, comme celles qui paraissent totalement inutiles. Le résultat a été que les propriétés d'un espace (ou espace-temps) courbe, en n'importe quelle dimension, sont décrites par un certain objet mathématique, que nous appelons aujourd'hui courbure de Riemann et que nous indiquons par R_{ab} . Si vous pensez à un paysage de plaines, de collines et de montagnes, la courbure R_{ab} du sol est zéro dans les plaines, qui sont plates, sans courbure, elle est différente de zéro là où alternent des vallées et des collines, et elle est maximale là où s'élèvent les pics aigus des montagnes, c'est-à-dire là où le sol est le moins plat, le plus « courbe ». Dans la thèse de Riemann, on décrit de la même façon des espaces courbes tridimensionnels ou à quatre dimensions.

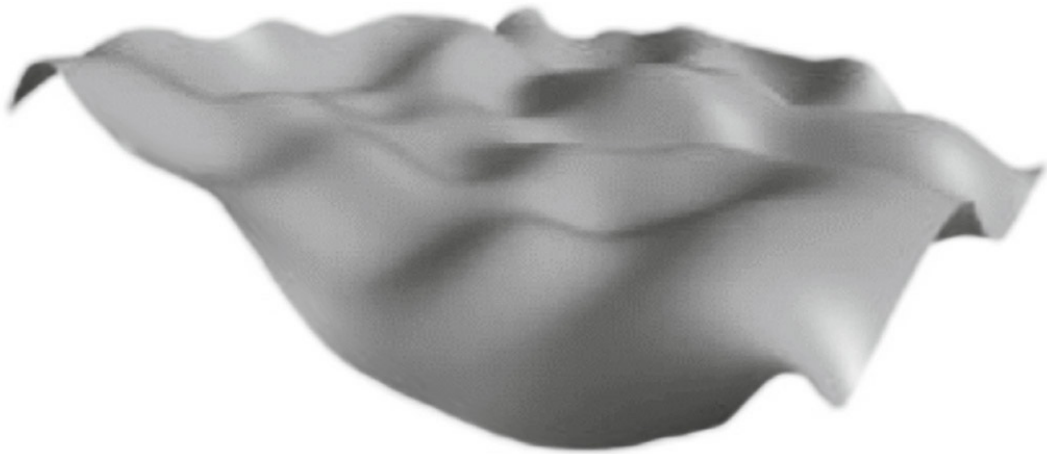


Figure 3.6. Une surface (bidimensionnelle) courbe.

Einstein étudie, avec de gros efforts, la mathématique de Riemann, se la faisant expliquer par des amis qui comprenaient les mathématiques mieux que lui, et il écrit une équation pour laquelle la courbure de Riemann R_{ab} de l'espace-temps est proportionnelle à l'énergie de la matière. Ce qui signifie que l'espace-temps s'incurve le plus là où il y a le plus de matière. Tout est là. Cette équation est l'analogue des équations de Maxwell, mais pour la gravité et non l'électricité. L'équation tient en une demi-ligne, rien de plus. Une vision, et une équation.

Mais dans cette équation on découvre un Univers fabuleux. Et toute la richesse magique de cette théorie se révèle, en une succession de prédictions qui semblent relever du délire d'un fou. Jusqu'au début des années 1980, presque personne ne prenait au sérieux la plupart de ces prédictions rocambolesques. Or, l'une après l'autre, elles ont toutes été confirmées par l'expérience. Voyons-en quelques-unes.

Tout d'abord, Einstein recalcule l'effet d'une masse comme le Soleil sur la courbure de l'espace alentour, et l'effet de cette courbure sur le mouvement des planètes. Il retrouve le mouvement des planètes prévu

par Kepler et par les équations de Newton, mais pas exactement : dans le voisinage du Soleil, l'effet de la courbure de l'espace est plus fort que l'effet de la force de Newton. Einstein calcule, en particulier, le mouvement de Mercure, la planète la plus proche du Soleil, et donc celle pour laquelle l'écart entre les prédictions de sa théorie et celles de la théorie de Newton est le plus grand, et il trouve une différence : le point de l'orbite de Mercure le plus proche du Soleil se déplace chaque année de 0,43 seconde d'arc en plus de ce que prévoit la théorie de Newton. C'est une petite différence, mais elle est dans le domaine de ce que les astronomes parviennent à mesurer, et en confrontant les prédictions avec les observations des astronomes, le verdict est sans appel : Mercure suit la trajectoire prédite par la relativité générale, non celle prédite par la force de Newton. Le rapide messager des dieux, le dieu aux sandales ailées, donne raison à Einstein, non à Newton.

L'équation d'Einstein, ensuite, décrit comment s'incurve l'espace près d'une étoile. À cause de cette courbure, la lumière dévie, et Einstein prédit que le Soleil dévie la lumière. En 1919, la mesure est effectuée, et une déviation de la lumière – exactement de la quantité prédite – est mesurée.

Mais ce n'est pas seulement l'espace qui s'incurve, c'est aussi le temps. Einstein prédit que le temps sur la Terre passe plus vite en altitude et plus lentement au niveau de la mer. On le mesure : c'est vrai. Aujourd'hui, nous disposons d'horloges extrêmement précises, dans de nombreux laboratoires, et il est possible de mesurer ce très étonnant effet à quelques centimètres d'écart. Placez une horloge sur le carrelage et une autre sur la table : celle du carrelage mesure moins de temps passé par rapport à celle posée sur la table. Pourquoi ? Parce que le temps n'est pas universel et fixe, il s'allonge et se raccourcit en fonction des masses présentes : la Terre, comme toutes les masses, déforme l'espace-temps en ralentissant le temps dans son voisinage. De

très peu, certes, mais deux jumeaux qui auraient vécu l'un au bord de la mer et l'autre en montagne n'auraient plus le même âge lorsqu'ils se rencontreraient ([figure 3.7](#)).

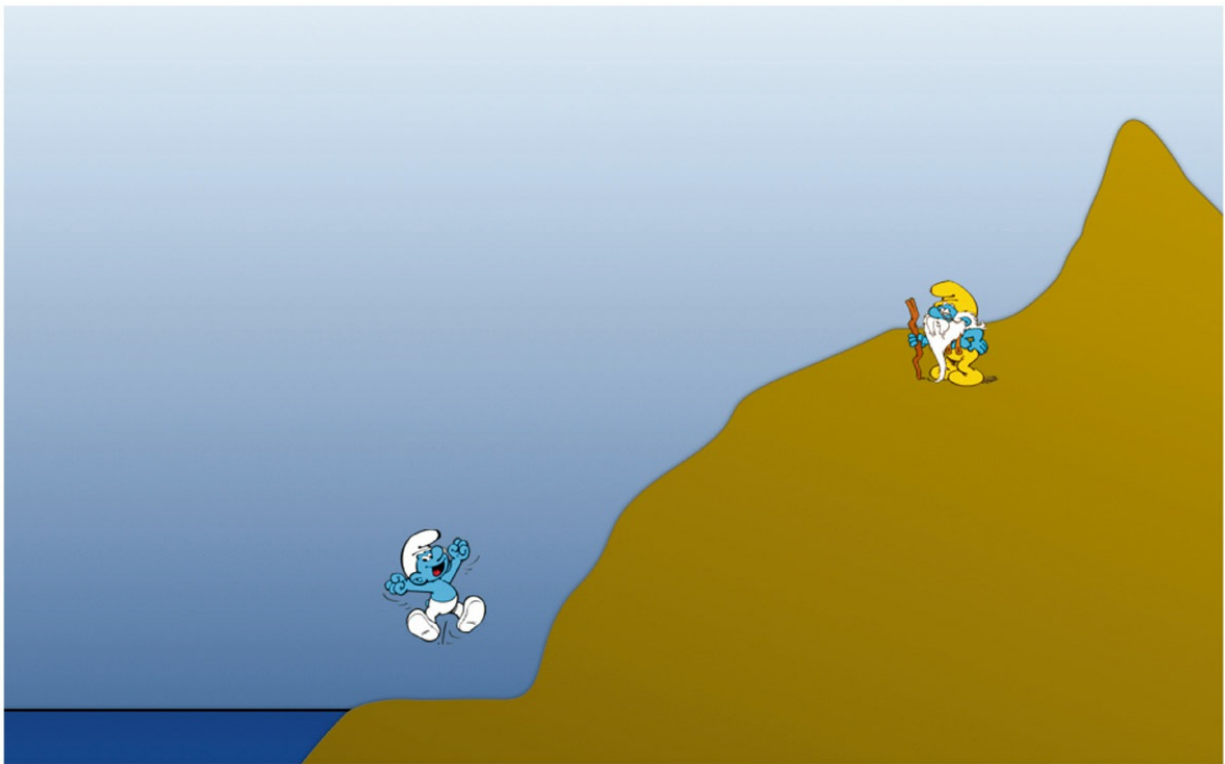


Figure 3.7. Deux jumeaux vivent, l'un au bord de la mer, l'autre à la montagne. Lorsqu'ils se retrouvent, le jumeau qui a vécu en montagne est plus vieux, car le temps subit une dilatation gravitationnelle.

Cela permet de donner une nouvelle explication de la raison pour laquelle les corps tombent. Si vous regardez sur une carte du monde la route d'un avion qui vole de Rome à New York, elle ne paraît pas droite : l'avion fait un arc vers le nord. Pourquoi ? Parce que, la Terre étant courbe, passer plus au nord est plus court que de rester sur le même parallèle. Les distances entre les méridiens étant plus courtes

quand on est plus au nord, il convient donc de monter au nord pour « gagner du temps » (figure 3.8).

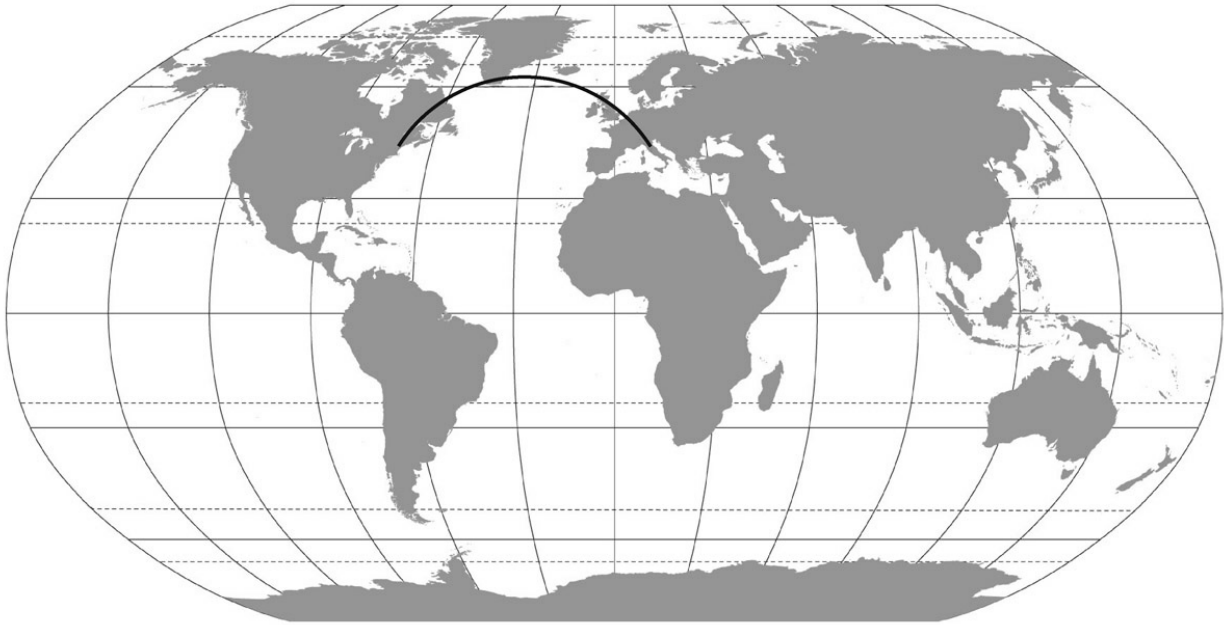


Figure 3.8. Plus au nord, les distances entre deux longitudes sont plus courtes.

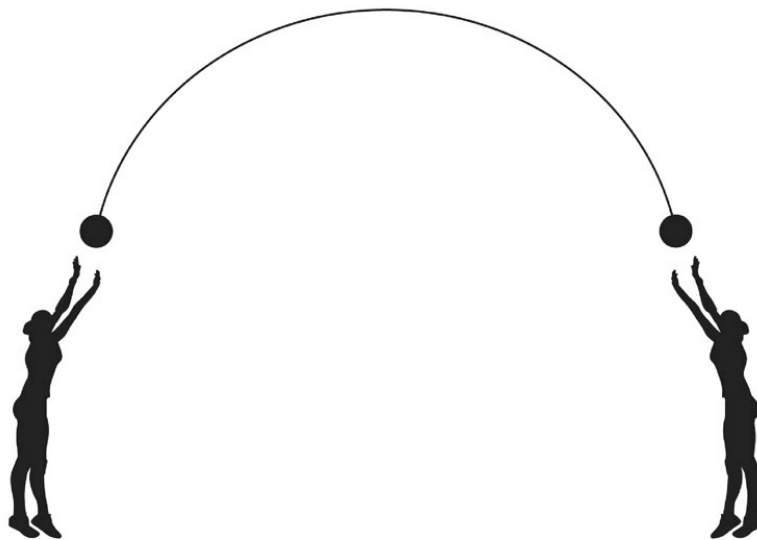


Figure 3.9. Plus haut, le temps passe plus vite.

Un ballon lancé en l'air retombe pour la même raison : il « gagne du temps » en passant plus haut, parce que plus haut, le temps passe plus vite. Dans les deux cas, l'avion et le ballon parcourent une trajectoire rectiligne dans un espace (un espace-temps) courbe (figure 3.9)⁴.

Mais les prédictions de la théorie vont bien au-delà de ces petits effets. Toutes les étoiles finissent par s'éteindre quand elles ont brûlé tout l'hydrogène dont elles disposent, et qui est le combustible qui leur permet de brûler. Le matériau résiduel n'est plus soutenu par la pression de la chaleur et se comprime sous son propre poids. Quand cela arrive à une étoile assez grande, la matière se comprime énormément et l'espace se courbe tellement qu'il s'effondre dans un véritable trou. Voilà comment naissent les trous noirs.

Lorsque j'étudiais à l'université, les trous noirs étaient considérés comme des conséquences peu crédibles d'une théorie ésotérique. Aujourd'hui, on en observe des centaines dans le ciel et les astronomes les étudient en détail. Un de ces trous noirs, d'une masse d'un million de fois celle de notre Soleil, se tient au centre de notre galaxie, et nous pouvons observer des étoiles qui tournent autour et certaines qui sont déchiquetées par sa gravité, lorsqu'elles passent trop près de lui.

Par ailleurs, la théorie prédit que l'espace se plisse comme la surface de la mer, et ces plis sont des ondes semblables aux ondes électromagnétiques grâce auxquelles nous regardons la télévision. Les effets de ces « ondes gravitationnelles » sont observées dans le ciel sur les étoiles binaires, qui irradient ces ondes en perdant de l'énergie et, donc, en se rapprochant lentement l'une de l'autre⁵. Les effets observés concordent avec les prévisions de la théorie, avec une précision remarquable, au cent milliardième près.

Ajoutons à cela la prédiction, correcte, que l'espace de l'Univers est en expansion, et la déduction que l'Univers résulte d'une explosion cosmique il y a quatorze milliards d'années, dont je parlerai plus en détail bientôt...

Toute cette riche et complexe phénoménologie – déviation des rayons lumineux, modification de la force de Newton, ralentissement des horloges, trous noirs, ondes gravitationnelles, expansion de l'Univers, Big Bang... – résulte du fait d'avoir compris que l'espace n'est pas un cadre immobile, mais qu'il a lui-même, comme la matière et les autres champs qu'il contient, sa propre dynamique, sa propre physique. Démocrite aurait peut-être souri de plaisir s'il avait pu prévoir que l'existence de son espace aurait un tel avenir. Il est vrai qu'il l'appelait « non-être », mais ce qu'il entendait par « être » (δὲν), c'était la matière ; pour lui, le « non-être », le vide, « possède une certaine nature (φύσιν) et sa propre substance⁶ ».

Sans la notion de champ introduite par Faraday, sans la puissance spectaculaire des mathématiques, sans les géométries de Gauss et de Riemann, cette « certaine nature » reste très vague. Fort des outils conceptuels nouveaux et des mathématiques, Einstein écrit les équations qui la décrivent, et trouve dans la « certaine nature » du vide démocritéen un monde coloré et stupéfiant, où des univers explosent, l'espace s'effondre dans des trous sans issue, où le temps accélère au sommet des montagnes et où les distances infinies d'espace interstellaire se plissent comme la surface de la mer...

Tout cela, à première vue, a l'air d'« une fable pleine de bruit et de fureur, racontée par un idiot ». En fait, ce n'est qu'un regard vers la réalité, un peu moins voilé que celui de notre banalité quotidienne. Une réalité qui semble elle aussi faite de la matière dont sont faits les rêves, et toutefois plus réelle que notre rêve quotidien. Et c'est seulement le résultat d'une intuition élémentaire : l'espace-temps et le

champ gravitationnel sont une seule et même chose. Et d'une équation simple, que je ne résiste pas au plaisir de recopier ici, même si mes vingt-cinq lecteurs ne pourront probablement pas la déchiffrer... J'aimerais, cependant, qu'ils en relèvent au moins la grande simplicité.

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} + \Lambda g_{ab} = 8\pi G T_{ab}$$

En 1915, cette équation était encore plus simple, car il n'y avait pas encore le terme $+\Lambda g_{ab}$ ajouté par Einstein deux ans plus tard⁷ et dont je parlerai plus loin. R_{ab} dépend de la courbure de Riemann qui, avec Rg_{ab} , représente la courbure de l'espace-temps ; T_{ab} représente l'énergie de la matière ; G est la constante de Newton, celle qui détermine la force de la force de gravité.

C'est tout. Une vision, et une équation.

Mathématiques ou physique ?

Je voudrais ici marquer une pause avant de poursuivre, pour proposer quelques considérations sur les mathématiques. Einstein n'était pas un grand mathématicien. Et même, de son propre aveu, il éprouvait de grosses difficultés en mathématiques. En 1943, il répond ainsi à une fillette de 9 ans, prénommée Barbara, qui lui écrit en lui disant qu'elle a des difficultés dans cette matière : « Ne t'inquiète pas si tu as des difficultés en mathématiques, je peux t'assurer que les miennes sont bien plus grandes encore⁸. » On dirait une boutade, mais Einstein ne plaisantait pas. En mathématiques, il se faisait aider : de patients camarades d'études et amis, comme Marcel Grossmann, les lui expliquaient. C'est son intuition physique qui était prodigieuse.

Au cours de l'année où il achevait de bâtir sa théorie, il a dû entrer en compétition avec David Hilbert, un des plus grands mathématiciens de tous les temps. Einstein était sur le point de faire une découverte importante : il avait saisi l'idée et il s'était mis au travail pour le prendre de court et formuler le premier les bonnes équations de la théorie. Le sprint final entre les deux géants a été palpitant et s'est joué à quelques jours près : Einstein, à Berlin, donnait une conférence publique par semaine, présentant chaque fois différentes équations, de crainte que Hilbert le devance. Chaque fois, les équations étaient erronées. Finalement, Einstein l'a emporté sur le fil, en trouvant *in extremis* les bonnes équations.

Hilbert, grand seigneur, n'a jamais contesté la victoire d'Einstein, bien qu'il eût travaillé aux mêmes équations. Il a même écrit une très belle phrase, qui saisit parfaitement le rapport difficile entre Einstein et les mathématiques, ou peut-être entre la physique tout entière et les mathématiques. Les mathématiques nécessaires à la théorie étaient la géométrie à quatre dimensions ; Hilbert écrit ceci : « N'importe quel gars, dans les rues de Göttingen⁹, comprend mieux qu'Einstein la géométrie à quatre dimensions. Malgré cela, c'est Einstein qui a fait le travail, pas les mathématiciens. »

Pourquoi ? Parce que Einstein avait une capacité unique d'*imaginer* comment le monde pouvait être fait, de le « voir » mentalement. Les équations, pour lui, venaient après ; elles étaient le langage capable de traduire sa vision de la réalité. La théorie de la relativité générale, pour Einstein, n'est pas un ensemble d'équations : c'est une image mentale du monde, traduite ensuite laborieusement en équations.

L'idée de sa théorie est simplement que l'espace-temps se courbe. Si l'espace-temps physique n'avait que deux dimensions, et si nous vivions sur un plan, il serait facile d'imaginer ce que veut dire « l'espace physique se courbe ». Cela voudrait dire que l'espace physique où nous

vivons n'est pas comme une grande table plate, mais comme une surface alternant montagnes et vallées. Mais le monde où nous vivons n'a pas deux, mais trois dimensions. Et même quatre, avec le temps. Imaginer un espace à quatre dimensions qui se courbe est plus compliqué, car nous n'avons pas l'intuition d'un « espace plus grand » dans lequel nous puissions courber l'espace-temps physique. Mais l'imagination d'Einstein n'a eu aucun mal à penser la méduse cosmique dans laquelle nous sommes immergés, qui peut être écrasée, étirée et tordue, et qui constitue l'espace-temps autour de nous. C'est grâce à cette clarté visionnaire qu'Einstein est parvenu à construire la théorie le premier.

À la fin, il y a eu quelques tensions entre Hilbert et Einstein. Quelques jours avant qu'Einstein rende publique son équation (celle écrite à la fin du sous-chapitre précédent), Hilbert avait envoyé à une revue un article où il montrait qu'il était tout près de la même solution, et aujourd'hui encore les historiens des sciences éprouvent quelque perplexité à évaluer les contributions respectives de ces deux géants. Il a même régné un certain froid entre les deux hommes, quand Einstein a craint que Hilbert, plus âgé et plus puissant que lui, s'attribue trop de mérite dans l'élaboration de la théorie. Mais Hilbert n'a jamais revendiqué la priorité de la découverte de la relativité générale et, dans un monde comme l'est celui de la science, où souvent – trop souvent – les disputes de priorité finissent par empoisonner les esprits, tous deux donneront un très bel exemple de sagesse, en éliminant toute tension : Einstein écrivit à Hilbert une magnifique lettre, qui résume le sens profond de la manière dont il avait perçu son propre parcours.

Un certain malaise a existé entre nous, dont je veux oublier l'origine. J'ai réussi à chasser l'amertume que j'en ai éprouvée. Je pense de nouveau à vous avec une sereine

amitié et je vous demande d'en faire de même envers moi. Il serait dommage que deux vrais collègues qui ont réussi à s'évader de ce monde sordide ne s'apportent pas un plaisir mutuel¹⁰.

Le cosmos

Deux ans après la publication de ses équations, Einstein envisage de les utiliser pour décrire l'espace de l'Univers entier, considéré à très large échelle. Et là, il a une nouvelle idée extraordinaire.

Pendant des milliers d'années, les hommes se sont demandé si l'Univers était fini ou s'il avait un bord. Les deux hypothèses sont gênantes. L'idée d'un Univers infini ne paraît pas raisonnable : s'il est infini, par exemple, il existe nécessairement quelque part un autre lecteur comme toi occupé à lire ce livre (l'infini est vraiment vaste, et il n'y a pas assez de combinaisons d'atomes pour le remplir d'objets différents les uns des autres). Et, même, il doit y avoir non seulement un, mais une kyrielle infinie de lecteurs semblables à toi... Mais s'il y a un bord, de quoi s'agit-il ? Quel sens un bord a-t-il s'il n'y a plus rien au-delà ? À Tarente, au VI^e siècle avant J.-C., le philosophe pythagoricien Archytas écrivait :

Si je me trouvais à la limite extrême du ciel, autrement dit sur la sphère des fixes, pourrais-je tendre au-dehors la main ou un bâton, oui ou non ? Certes, il est absurde que je ne puisse pas le faire ; mais, si j'y parviens, cela implique l'existence d'un dehors, corps ou lieu. On avancera donc sans cesse, de la même manière, vers la limite sans cesse atteinte,

en posant la même question et, comme ce qu'atteindra le bâton sera sans cesse autre, il est clair que cet autre est aussi illimité¹¹.

À partir de là, il avait semblé que l'alternative entre l'absurdité d'un espace infini et l'absurdité d'un bord de l'Univers ne laissait aucune solution possible.

Einstein raisonne autrement ; en réalité, nous pouvons sauver la chèvre et le chou : l'Univers peut être fini et en même temps se passer de bord, comme la surface de la Terre n'est pas infinie mais finie, sans avoir de bord. Cela peut se produire, naturellement, s'il y a quelque chose de courbe (la surface de la Terre est courbe), et l'espace de la théorie de la relativité générale est justement courbe. Donc, il se peut que notre Univers soit fini, mais sans bord.

Sur la surface de la Terre, si je me mets à marcher toujours tout droit, je ne vais pas vers l'infini : je rejoins mon point de départ. Notre Univers pourrait être fait de la même façon : si je voyage dans un engin spatial toujours dans la même direction, je ferai le tour de l'Univers et reviendrai sur Terre. C'est ce qui se passerait dans un espace tridimensionnel, fini mais sans bord, appelé « 3-sphère ».

Pour comprendre à quoi ressemble une 3-sphère, revenons un moment à la sphère ordinaire : la surface d'une boule, ou celle de la Terre. Pour représenter sur un plan la surface de la Terre, nous pouvons dessiner deux disques, comme on le fait habituellement pour dessiner les continents ([figure 3.10](#)).

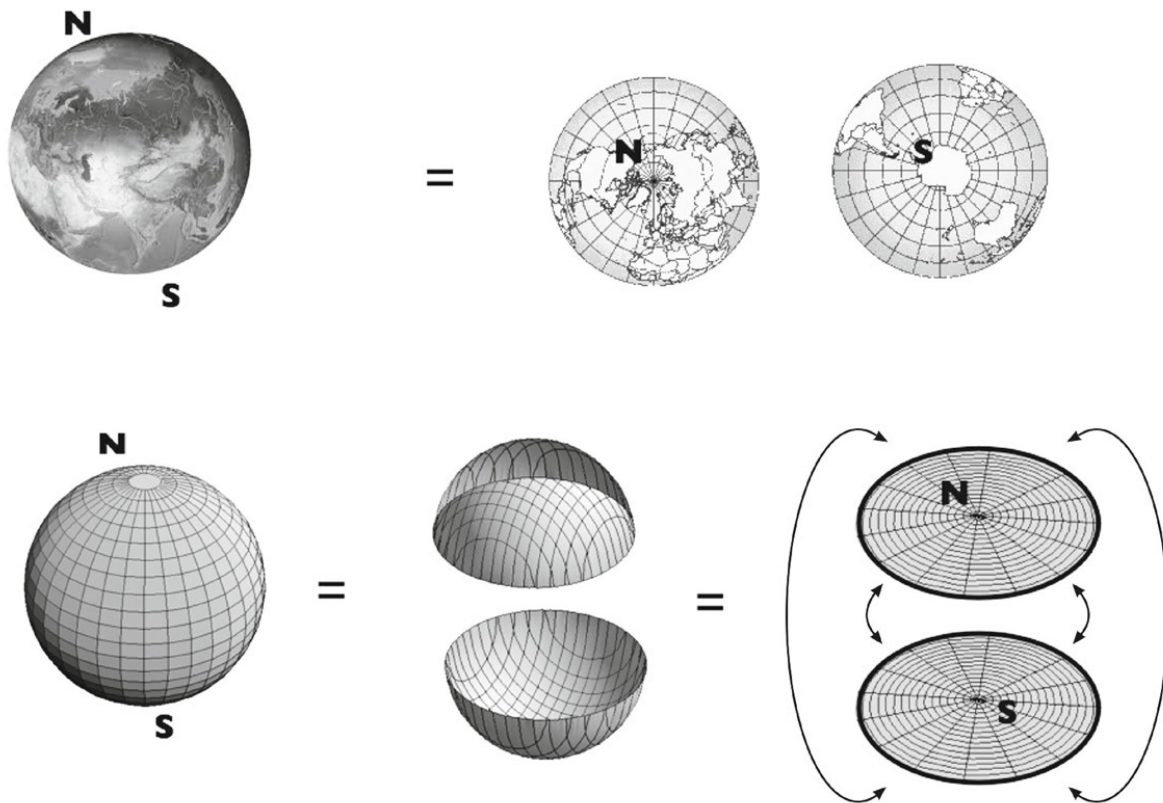


Figure 3.10. On peut représenter une sphère comme deux disques collés par le bord.

Notons qu'un habitant de l'hémisphère Sud est, d'une certaine manière, « entouré » par l'hémisphère Nord, puisque, quelle que soit la direction dans laquelle il se déplacera pour quitter son hémisphère, il arrivera toujours dans l'hémisphère Nord. Mais l'inverse est évidemment vrai aussi. Chacun des deux hémisphères « entoure » l'autre hémisphère, et en même temps en est entouré. Une 3-sphère peut être représentée de manière semblable, mais avec une dimension supplémentaire : deux balles collées par le bord ([figure 3.11](#)).

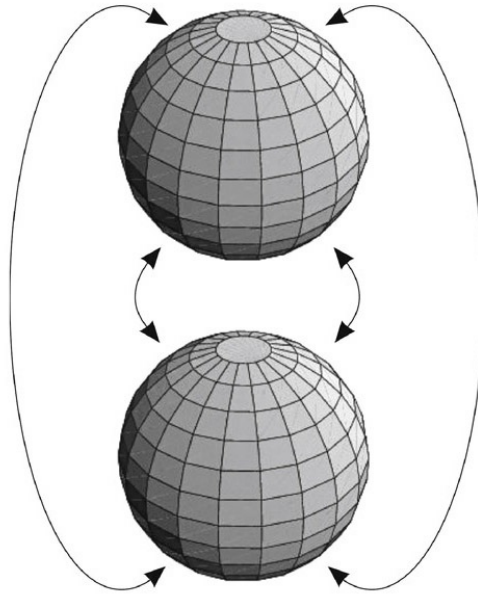
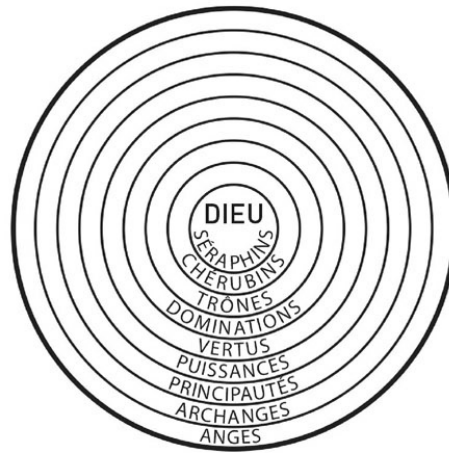


Figure 3.11. Une 3-sphère peut être représentée comme deux boules collées par le bord.

Quand on sort d'une boule, on entre dans l'autre (comme lorsqu'on sort d'un des deux disques de la représentation de la mappemonde, on entre dans l'autre) : chacune des deux boules « entoure » et est entourée en même temps par l'autre. L'idée d'Einstein est donc que l'espace pourrait être une 3-sphère : quelque chose de volume fini (la somme des volumes des deux boules), mais sans bord¹². La 3-sphère est la solution qu'Einstein propose au problème du bord de l'Univers, dans son travail de 1917. Ce travail fonde la cosmologie moderne, l'étude de tout l'Univers visible observé à très grande échelle. De là découlent la découverte de l'expansion de l'Univers, la théorie du Big Bang, le problème de la naissance de l'Univers, etc. Je parlerai de tout cela en détail au chapitre 8.

Avant de clore ce chapitre-ci, une autre observation concernant l'autre idée d'Einstein selon laquelle l'Univers est une 3-sphère. Si

incroyable que cela puisse paraître, cette idée avait déjà été conçue par un autre génie, dans un tout autre contexte culturel : Dante. Dans le *Paradis*, Dante nous offre sa grandiose vision du monde médiéval, calquée sur le monde d'Aristote, avec la Terre sphérique au centre, entourée par les sphères célestes ([figure 3.12](#)).



HIÉRARCHIE DES ANGES

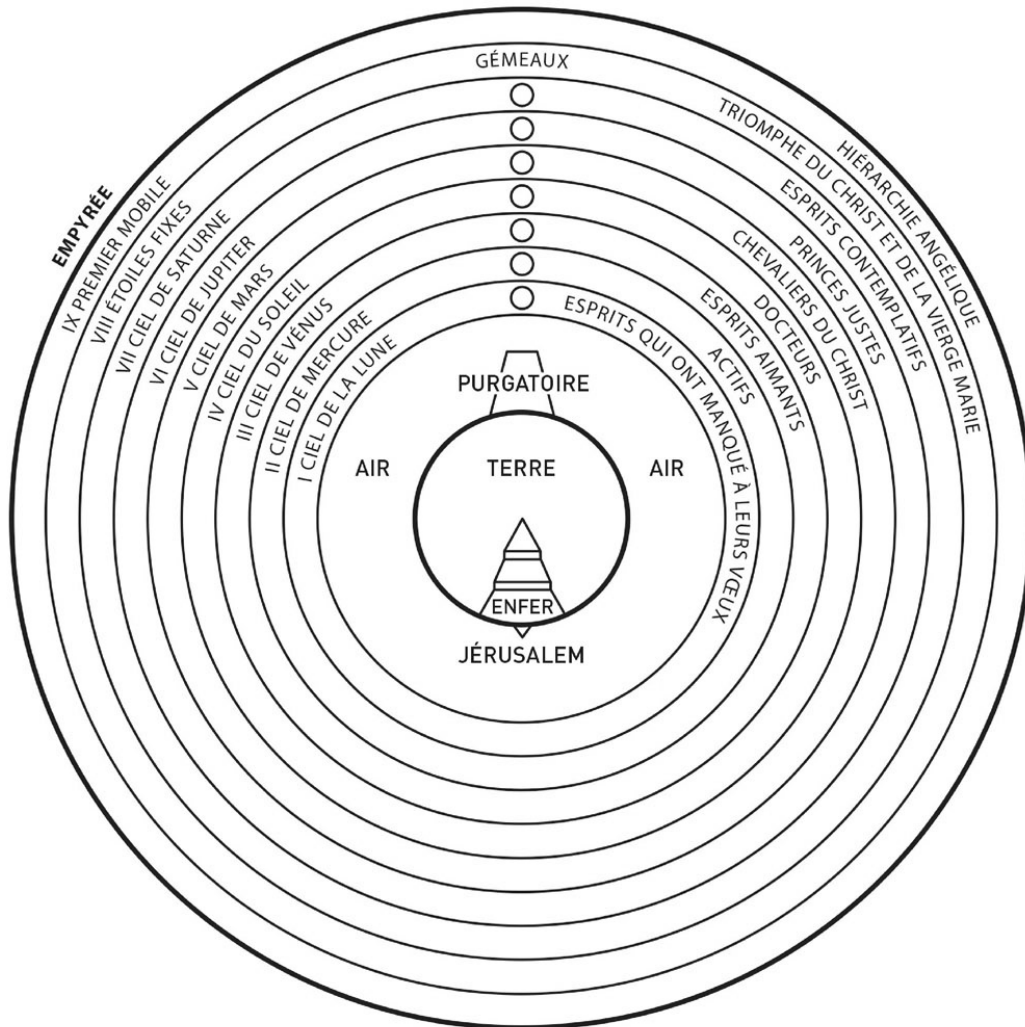


Figure 3.12. Représentation traditionnelle de l'Univers de Dante.

Dante visite ces sphères, avec Béatrice, dans son fantastique voyage visionnaire, jusqu'à la sphère extérieure. Lorsqu'il y parvient, il contemple l'Univers sous lui, avec les cieux qui tournent et, tout en bas, au centre, la Terre. Mais ensuite il regarde encore plus haut : que voit-il alors ? Un point lumineux entouré par d'immenses sphères d'anges, c'est-à-dire un autre cercle immense qui, selon ses termes, « semble enclos » par la sphère de notre Univers ! Voici les vers de Dante au chant XXVII du *Paradis* : « Lumière et amour l'entourent d'un cercle, et comme lui les autres cercles » ; et, au chant XXX, toujours à propos du dernier « cercle » : « et qui semble enclos dans ce qu'il enclôt... » Le point de lumière et les sphères d'anges entourent l'Univers et sont entourés par lui ! C'est exactement la description d'une 3-sphère.

Les représentations traditionnelles de l'Univers de Dante, courantes dans les manuels scolaires, montrent les sphères des anges séparées des sphères des cieux. Mais Dante dit que les deux cercles entourent et sont entourés l'un par l'autre. En d'autres termes, Dante a une claire intuition géométrique d'une 3-sphère¹³.

Le premier à avoir remarqué que le *Paradis* décrit l'Univers comme une 3-sphère a été le mathématicien américain Mark Peterson, en 1979. En général, évidemment, les spécialistes de Dante ne sont pas très familiers des 3-sphères. Aujourd'hui, tout physicien ou mathématicien reconnaît facilement la 3-sphère dans la description de l'Univers de Dante.

Comment Dante a-t-il pu avoir une idée si moderne ? Je crois que cela a été possible, avant tout, grâce à l'intelligence profonde de notre immense poète. C'est cette profonde intelligence qui suscite en grande partie le charme de *La Divine Comédie*, mais aussi le fait que Dante écrivait bien avant que Newton ne comprît que l'espace infini du

cosmos est l'espace plat de la géométrie euclidienne. L'intuition de Dante n'était pas entravée par notre éducation newtonienne.

Sa culture scientifique était fondée principalement sur les enseignements de son maître et tuteur, Brunetto Latini, dont nous avons un délicieux traité, *Li livres dou trésor*, une espèce d'encyclopédie du savoir médiéval, écrit dans un agréable mélange de français et d'italien archaïques. Dans *Li livres dou trésor*, Brunetto explique en détail le fait que la Terre soit sphérique. Mais il le fait – curieusement, pour un lecteur moderne – en termes de géométrie « intrinsèque », et non « extrinsèque ». Il n'écrit donc pas : « La Terre est comme une orange », comme la verrait un observateur extérieur, mais : « Deux cavaliers qui pourraient galoper assez longtemps en sens opposé se rencontreraient de l'autre côté. » Ou encore : « Un homme qui se mettrait en chemin et qui marcherait toujours reviendrait à son point de départ sur la Terre, s'il n'était arrêté par les mers », et ainsi de suite. Il se place donc toujours d'un point de vue intérieur, non extérieur. Le point de vue de quelqu'un qui marche sur la Terre, non de quelqu'un qui la regarde de l'extérieur. À première vue, c'est une façon bien compliquée de dire que la Terre est une boule. Pourquoi Brunetto ne dit-il pas simplement que la Terre est faite comme une orange ? Toutefois, si l'on y réfléchit bien : si une fourmi marche sur une orange, à un moment donné elle va se retrouver la tête en bas, et elle devra rester bien accrochée par les ventouses de ses pattes pour ne pas tomber. En revanche, un voyageur qui chemine sur la Terre ne se retrouve jamais la tête en bas et il n'a jamais besoin de ventouses pour rester attaché au sol. Les descriptions de Brunetto ne sont pas si farfelues.

À présent, réfléchissez bien : pour quelqu'un qui a appris que la forme de la surface de notre planète est telle que, en marchant toujours tout droit, on retourne à son point de départ, il n'est peut-être

pas si difficile de faire le pas suivant et d'imaginer que la forme de l'ensemble de l'Univers est telle que, en volant toujours tout droit, on retourne au même point : une 3-sphère est un espace où « deux cavaliers (aîlés) qui pourraient voler en sens opposé se rencontreraient de l'autre côté ». En termes plus techniques, la description de la géométrie de la Terre que nous propose Brunetto Latini dans *Li livres dou trésor*, en termes de géométrie intrinsèque (vue de l'intérieur) et non extrinsèque (vue de l'extérieur), est exactement celle qui permet de généraliser la notion de sphère de deux dimensions à trois dimensions. La meilleure façon de définir une 3-sphère n'est pas d'essayer de la voir de l'extérieur, mais de décrire ce qui se produit quand on se meut à l'intérieur.

Jusque-là, je n'ai pas voulu dévoiler le moyen imaginé par Gauss pour décrire les surfaces courbes, moyen généralisé par Riemann pour décrire la courbure des espaces à trois dimensions ou plus. À présent, je peux le dire : c'est essentiellement l'idée de Brunetto Latini. L'idée de ne pas décrire un espace courbe en le regardant de l'extérieur, c'est-à-dire en disant comment il se courbe dans un autre espace, mais de le décrire en termes de ce que pourrait mesurer quelqu'un situé à *l'intérieur* de cet espace, qui se déplacerait et qui mesurerait uniquement à partir de cet espace. Par exemple, la surface d'une sphère ordinaire est – comme l'observe Brunetto – une surface où toutes les lignes « droites » retournent au point de départ après avoir parcouru la même distance (la longueur de l'équateur). Une 3-sphère est un espace tridimensionnel ayant la même propriété.

L'espace-temps d'Einstein n'est pas courbe au sens où il se courberait « à l'intérieur d'un espace plus grand ». Il est courbe au sens où sa géométrie intrinsèque, c'est-à-dire le réseau des distances entre ses points – qu'on peut observer en étant *dans* l'espace –, n'est pas la

même qu'un espace plan. C'est un espace où le théorème de Pythagore n'est pas valable, tout comme il ne l'est pas sur la surface de la Terre¹⁴.

Il existe un moyen de comprendre la courbure d'un espace de l'intérieur, et sans le voir de l'extérieur, qui est important pour la suite. Imaginez que vous êtes au pôle Nord et que vous marchez vers le sud jusqu'à l'équateur avec une flèche à la main pointée devant vous. Une fois à l'équateur, tournez-vous vers la gauche sans bouger la flèche. La flèche pointe encore vers le sud, à présent à votre droite. Faites un pas vers l'est le long de l'équateur, et tournez-vous de nouveau vers le nord, sans bouger la flèche, qui à présent pointera vers vos épaules. Quand vous arriverez de nouveau au pôle Nord, vous aurez effectué un circuit fermé, et la flèche ne pointera pas dans la même direction que quand vous êtes parti ([figure 3.13](#)). L'angle dans lequel s'est tournée la flèche mesure la courbure.

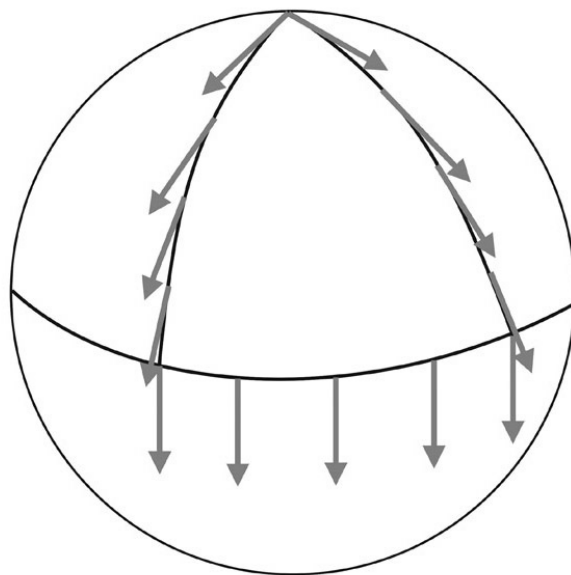


Figure 3.13. Une flèche transportée parallèlement à elle-même le long d'un circuit dans un espace courbe change de direction.

Je reviendrai plus tard sur la façon de mesurer la courbure en faisant des boucles dans l'espace.

Dante quitte Florence en 1301, alors qu'on est en train d'achever les mosaïques de la coupole du baptistère Saint-Jean. La terrifiante (aux yeux d'un homme du Moyen Âge) mosaïque qui représente l'Enfer, œuvre de Coppo di Marcovaldo, le maître de Cimabue, a souvent été considérée comme une source d'inspiration pour Dante ([figure 3.14](#)).



Figure 3.14. La mosaïque de Coppo di Marcovaldo, qui représente l'Enfer, dans le baptistère Saint-Jean de Florence.

Peu avant de commencer à écrire ce livre, je suis entré dans le baptistère Saint-Jean avec Emanuela Minnai, l'amie qui m'a convaincu de le faire. À l'entrée, si on lève la tête, on voit un point de lumière (au sommet de la coupole) entouré par neuf ordres d'anges (avec le nom de chacun des ordres écrit : Anges, Archanges, Principautés, Puissances, Vertus, Dominations, Trônes, Chérubins et Séraphins). C'est exactement la structure de la seconde boule du *Paradis*. Si vous imaginez être une fourmi sur le dôme du Baptistère et que vous

marchez dans n'importe quelle direction, vous atteindrez le plafond et le point de lumière entouré par les anges : ce point de lumière et ses anges entourent, et en même temps sont entourés, par le reste des décorations internes du baptistère ([figure 3.15](#)).



Figure 3.15. L'intérieur du baptistère Saint-Jean.

Dante, comme tout citoyen de Florence à la fin du XIII^e siècle, a dû être profondément impressionné par cette œuvre grandiose en voie d'achèvement. Je pense qu'il a pu s'inspirer de l'*Enfer* de Coppo di Marcovaldo pour concevoir toute l'architecture de son cosmos. Le

Paradis en reproduit exactement la structure, y compris les neuf cercles d'anges et le point de lumière, la transposant en une structure de deux à trois dimensions. Déjà son maître, Brunetto, après avoir décrit l'Univers sphérique d'Aristote, ajoute qu'au-delà se trouve le lieu du divin, et déjà l'iconographie médiévale avait imaginé le paradis comme un Dieu entouré par les sphères des anges. Finalement, Dante ne fait que monter les pièces déjà existantes, en suivant la suggestion de la structure interne du baptistère Saint-Jean, en un tout architectonique cohérent qui résout le problème antique d'éliminer les bords de l'Univers, anticipant ainsi de six siècles la 3-sphère d'Einstein.

J'ignore si le jeune Einstein avait rencontré le *Paradis* durant ses flâneries intellectuelles italiennes, et si l'imagination effrénée de Dante a eu une influence directe sur son intuition que l'Univers puisse être fini et sans bord. Mais qu'il y ait eu influence directe ou pas, je crois que cet exemple montre combien la grande science et la grande poésie sont toutes deux pareillement visionnaires et qu'elles peuvent parfois parvenir aux mêmes intuitions. Notre culture, qui sépare science et poésie, est stupide, parce qu'elle se rend myope à la complexité et à la beauté du monde, révélées par ces deux disciplines.

Certes, la 3-sphère de Dante n'est qu'une vague intuition au sein d'un rêve. La 3-sphère d'Einstein prend une forme mathématique et Einstein l'intègre dans ses équations. L'effet est très différent. Dante parvient à nous émouvoir profondément, en touchant la source de nos émotions. Einstein ouvre une voie qui nous conduit à la source de notre Univers. Mais tous deux figurent parmi les plus belles envolées dont notre pensée s'est montrée capable.

Mais revenons en 1917, quand Einstein essaie d'intégrer l'idée de la 3-sphère dans son équation. Là, il rencontre une difficulté. Il est convaincu que l'Univers est immobile et immuable, mais son équation indique que c'est impossible. Il n'est pas difficile d'en comprendre la

raison. Étant donné que tout s'attire, la seule façon pour qu'un Univers fini ne s'effondre pas sur lui-même est qu'il s'étende, de même que la seule façon d'éviter qu'un ballon de foot tombe par terre est de l'envoyer en l'air. Il va soit vers le bas, soit vers le haut : il ne peut pas rester suspendu à mi-chemin.

Einstein s'entête à ne pas croire ce que lui disent ses équations. Il parvient même à commettre d'absurdes erreurs de physique, pour ne pas admettre l'évidence de ce que prédit sa théorie : que l'Univers est en contraction ou en expansion. Finalement, il doit céder : c'est sa théorie qui a raison, pas lui. À la même époque, en effet, les astronomes s'aperçoivent que toutes les galaxies s'éloignent de nous. L'Univers est effectivement en expansion, exactement comme le prévoient les équations d'Einstein. Elles nous disent comment cette expansion s'est produite dans le passé. La conséquence en est que, il y a environ quatorze milliards d'années, tout l'Univers devait être concentré en un seul point, extrêmement chaud. À partir de là, il s'est dilaté en une gigantesque explosion « cosmique ». (Ici, « cosmique » n'est pas employé au sens figuré. C'est bien une explosion cosmique.) C'est le Big Bang, la grande explosion.

Une fois de plus, au début, personne n'y croyait. Einstein lui-même se montrait réticent à accepter ces conséquences extrêmes de sa théorie, et il modifia ses propres équations pour essayer de les éviter. Le terme Λ_{ab} , qui figure dans l'équation mentionnée à la fin du premier sous-chapitre, a été ajouté dans ce but. Sauf que Einstein se trompait : le terme ajouté est juste, mais il n'évite pas la nécessité que l'Univers soit en expansion.

Aujourd'hui, nous savons que l'expansion est réelle. La preuve définitive de tout le scénario prévu par les équations d'Einstein est arrivée en 1964, lorsque deux radioastronomes américains, Arno Penzias et Robert Wilson, ont découvert tout à fait par hasard un

rayonnement, diffus dans tout l'Univers, qui apparaît comme étant le reste fossilisé de l'événement initial. Cette fois encore, la théorie apparaît correcte même dans ses prévisions les plus stupéfiantes.

Il y a des chefs-d'œuvre absolus qui nous bouleversent intensément : le *Requiem* de Mozart, l'*Odyssée*, la chapelle Sixtine, le *Roi Lear*... En apprécier la splendeur demande parfois un très long parcours d'apprentissage, mais la récompense en est la pure beauté. Nos yeux s'ouvrent à un regard neuf sur le monde. La relativité générale, le joyau d'Albert Einstein, est un de ces chefs-d'œuvre.

Il faut un parcours d'apprentissage pour comprendre les mathématiques de Riemann et maîtriser la technique permettant de lire complètement l'équation d'Einstein. Il faut de l'investissement et de la fatigue, mais moins que ceux nécessaires pour arriver à percevoir toute la beauté d'un des derniers quatuors de Beethoven. Dans un cas comme dans l'autre, l'effort, une fois accompli, en vaut la peine : la science et l'art nous enseignent quelque chose de nouveau sur le monde en nous donnant des yeux neufs pour le voir, en saisir la richesse, la profondeur, la beauté. La grande physique est comme la grande musique : elle parle directement au cœur et nous ouvre les yeux à la beauté, à la profondeur, à la simplicité de la nature des choses.

Je me souviens de mon émotion quand j'ai commencé à y comprendre quelque chose. C'était l'été. J'étais sur une plage de Calabre, à Condofuri, baigné par le soleil de la grécité méditerranéenne, à l'époque de ma dernière année d'université. Je travaillais ma relativité générale, un livre un peu rongé par les rats car je l'avais utilisé pour boucher les trous de ces bestioles, la nuit, dans la maison délabrée et un peu hippie sur la colline d'Ombrie où j'allais me réfugier de l'ennui des cours universitaires de Bologne. De temps en temps, je levais les yeux du livre pour regarder scintiller la mer : j'avais

l'impression de voir les courbures de l'espace et du temps imaginées par Einstein. C'était magique : c'était comme si un ami me murmurait à l'oreille une extraordinaire vérité cachée qui, d'un coup, ôtait un voile de la réalité pour en révéler un ordre plus simple et plus profond.

Depuis que nous savons que la Terre est ronde et qu'elle tourne comme une toupie, nous avons compris que la réalité n'est pas telle qu'elle nous apparaît. Chaque fois que nous en entrevoyons un aspect nouveau, c'est une extraordinaire émotion, et c'est un nouveau voile qui se soulève. En montrant que l'espace-temps est un champ, que le monde n'est fait que de champs et de particules, sans rien d'autre de distinct, qu'il s'agisse de l'espace ou du temps ([figure 3.16](#)), Einstein a soulevé un voile à nul autre pareil.

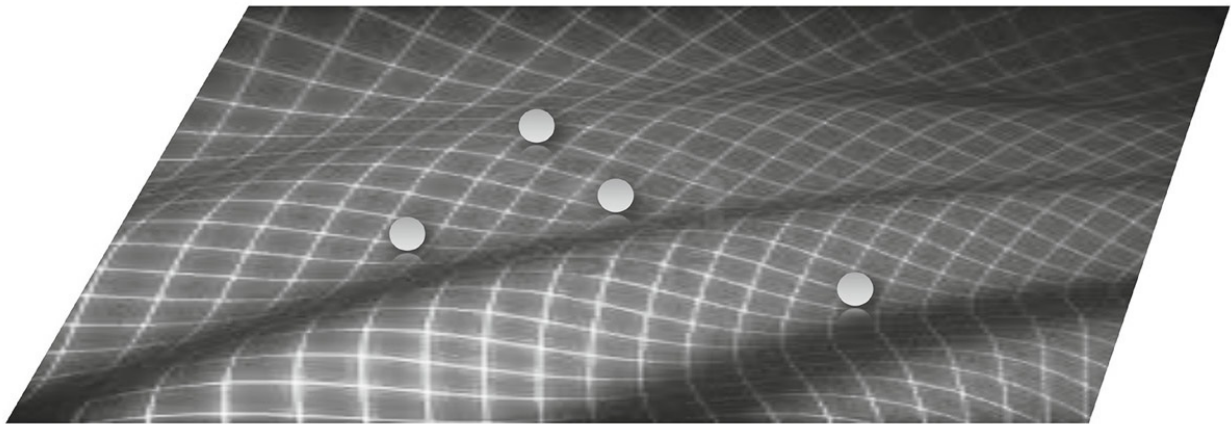


Figure 3.16. Le monde d'Einstein : des particules et des champs qui se meuvent dans d'autres champs.

En 1953, un enfant d'école primaire écrit à Albert Einstein : « Notre classe étudie l'Univers. Je m'intéresse beaucoup à l'espace. Je voudrais te remercier pour tout ce que tu as fait, comme ça nous pouvons comprendre¹⁵. »

Je me sens dans le même état d'esprit.

-
1. L'ensemble des événements à distance du genre espace par rapport à un observateur.
 2. Le lecteur astucieux objectera que le moment *au milieu* de mon quart d'heure peut être considéré comme simultané à sa réponse. Le lecteur qui a étudié la physique reconnaîtra là la « convention d'Einstein » pour définir la simultanéité. Cette définition de la simultanéité, toutefois, dépend de la façon dont je me déplace, et donc elle ne définit pas la simultanéité directement entre deux faits, mais seulement une simultanéité « relative » au mouvement de corps particuliers. Dans la [figure 3.3](#), un point est à mi-chemin entre *a* et *b*, les points où je sors du passé de l'observateur pour entrer dans son futur. L'autre point est à mi-chemin entre *c* et *d*, les points où je sors du passé de l'observateur pour entrer dans son futur si je me déplace sur une autre trajectoire. Les deux points sont simultanés pour le lecteur, selon cette définition de la simultanéité ; pourtant, ils adviennent dans des temps successifs. Chaque point est simultané pour le lecteur, mais « relativement » à deux mouvements différents. D'où le nom de « relativité ».
 3. Simplicius, *Aristotelis Physica*, 28, 15.
 4. L'avion et le ballon suivent des géodésiques dans une métrique courbe. Dans le cas du ballon, la géométrie est approchée par la métrique $ds^2 = (1 - 2\Phi(x)) dt^2 - dx^2$, où $\Phi(x)$ est le potentiel newtonien. L'effet du champ gravitationnel se réduit donc effectivement à la seule dilatation du temps. (Le lecteur qui connaît la théorie notera la curieuse inversion de signe : la trajectoire physique est celle qui *maximise* le temps propre, comme cela se produit toujours dans un contexte relativiste.)
 5. L'observation du pulsar binaire PSR B1913+16 montre que les deux étoiles qui tournent l'une autour de l'autre émettent des ondes gravitationnelles. Cette observation a valu à Russell Hulse et Joseph Taylor le prix Nobel en 1993.
 6. Plutarque, *Adversus colotem*, 4, 1108 et suiv. Le terme φύσις signifie « nature », également au sens de la « nature d'une chose ».
 7. Ce terme est dit « cosmologique », car il a des effets seulement à grande échelle, précisément à l'échelle cosmologique. La constante Λ s'appelle « constante cosmologique » et sa valeur a été mesurée à la fin des années 1990, ce qui a valu le prix Nobel aux astronomes Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt et Adam G. Riess en 2011.
 8. A. Calaprice, *Dear Professor Einstein. Albert Einstein's Letters to and from Children*, Prometheus Books, 2002, p. 140.

9. Göttingen, où Hilbert travaillait, était le siège de la plus grande école de géométrie de l'époque.
10. Cette lettre est citée par A. Fölsing, *Einstein : A Biography*, Penguin, 1988, p. 337.
11. F. P. De Ceglia (dir.), *Scienziati di Puglia : secoli V a. C.-XXI*, Adda, 2007, 3^e partie, p. 18.
12. La sphère ordinaire est l'ensemble des points de $\mathbb{R}^3$ déterminés par l'équation $x^2 + y^2 + z^2 = 1$. La 3-sphère est l'ensemble des points de $\mathbb{R}^4$ déterminés par l'équation $x^2 + y^2 + z^2 + u^2 = 1$.
13. On a pu objecter à cette remarque que Dante parle de « cercles » et non de « sphères ». Mais cette objection ne tient pas ; Brunetto Latini écrit dans son livre : « Un cercle, comme une coquille d'œuf. » Le mot « cercle », pour Dante comme pour son maître et tuteur, désigne tout ce qui est circulaire, y compris les sphères.
14. Il est possible de former avec le pôle Nord et avec deux points choisis sur l'équateur un triangle à la surface de la Terre, avec trois côtés égaux et trois angles droits, chose irréalisable sur un plan.
15. A. Calaprice, *Dear Professor Einstein*, *op. cit.*, p. 208.

CHAPITRE 4

Les quanta

Les deux piliers de la physique du xx^e siècle, relativité générale et mécanique quantique, ne pourraient pas être plus différents. La relativité générale est une gemme compacte : conçue par un seul esprit, entièrement fondée sur l'effort de combiner les découvertes précédentes, elle est une vision simple et cohérente, conceptuellement limpide, de la gravité, de l'espace et du temps. La mécanique quantique – ou théorie des quanta –, en revanche, naît directement de résultats expérimentaux, comme des mesures d'intensité de radiation, des effets de la lumière sur certains métaux et des études sur les atomes, au terme d'une gestation d'un quart de siècle impliquant de nombreux acteurs. Cette théorie a obtenu un succès expérimental sans égal, conduisant à des applications qui ont changé notre vie quotidienne (l'ordinateur que j'utilise pour écrire, par exemple) ; mais, un siècle après sa naissance, elle reste enveloppée d'un voile d'obscurité et d'incompréhensibilité.

Dans ce chapitre, je vais essayer de préciser l'étrange contenu physique de cette théorie, en racontant comment elle est née et comment sont apparues peu à peu les trois idées centrales sur lesquelles elle repose : granularité, indéterminisme et relationnisme.

Puis je proposerai un résumé et tenterai d'expliquer ces trois idées de façon synthétique.

Encore Albert

On a l'habitude de dire que les quanta naissent exactement en 1900, comme s'ils ouvraient un siècle de pensée physique intense. Cette année-là, le physicien allemand Max Planck calcule le champ électromagnétique en équilibre à l'intérieur d'une boîte chaude. Pour obtenir une formule qui reproduise correctement les résultats expérimentaux, il est amené à utiliser un truc qui paraît insensé : imaginer que l'énergie du champ est distribuée en « quanta », c'est-à-dire en paquets, en petites briques d'énergie. Planck suppose que la taille de ces briques dépend de la fréquence (c'est-à-dire de la couleur) des ondes électromagnétiques. À une onde de fréquence ν , Planck associe un quantum d'énergie

$$E = h\nu$$

Dans cette formule, la première de la mécanique quantique, h est une nouvelle constante, que nous appelons aujourd'hui « constante de Planck ». C'est la constante qui détermine la quantité d'énergie présente dans chaque quantum d'énergie, pour la lumière de fréquence (couleur) ν . La constante h fixe l'échelle des phénomènes quantiques.

L'idée que l'énergie serait faite de quanta finis détonnait avec tout ce qu'on savait à l'époque : l'énergie était considérée comme ce qui pouvait varier de façon continue, et il n'y avait aucune raison de la penser constituée de grains. Par exemple, un pendule qui oscille a une énergie déterminée par l'amplitude de l'oscillation. Pourquoi devrait-il

pouvoir osciller seulement selon des amplitudes déterminées et pas d'autres ? Pour Max Planck, il ne s'agissait là que d'un étrange truc de calcul, qui fonctionnait – c'est-à-dire qui reproduisait les mesures du laboratoire – pour des raisons qui restaient obscures.

C'est Albert Einstein – encore lui – qui va comprendre, cinq ans plus tard, que les paquets d'énergie de Planck sont bien réels. C'est là le contenu du troisième des trois articles envoyés aux *Annalen der Physik* en 1905. C'est cette date qui marque la véritable naissance de la mécanique quantique.

Dans cet article, Einstein montre que la lumière est réellement faite de grains, de particules de lumière. Il part d'un phénomène curieux qui avait été récemment observé : l'effet photoélectrique. Certaines substances, lorsqu'elles sont frappées par la lumière, produisent un léger courant électrique, c'est-à-dire émettent des électrons. Ce sont celles que nous utilisons, par exemple, dans les cellules photoélectriques qui ouvrent les portes automatiques. Cela n'a rien de surprenant : la lumière transporte de l'énergie (par exemple, elle nous réchauffe), et cette énergie expulse les électrons de leurs atomes : elle leur donne une impulsion.

Mais il y a tout de même quelque chose d'étrange : il semblerait raisonnable de s'attendre que, si l'énergie de la lumière est faible, le phénomène ne se produise pas, mais qu'il se produise si l'énergie est suffisante. Or, ce qu'on observe, c'est que le phénomène ne se produit que si la *fréquence* de la lumière est élevée, mais pas si elle est basse. Il se produit, ou non, en fonction de la *couleur* de la lumière (sa fréquence), plutôt que selon son *intensité* (son énergie). La physique classique se montre incapable d'expliquer cela. Einstein reprend l'idée des paquets d'énergie de Planck, dont la taille dépend justement de la fréquence, et montre que si ces paquets sont réels le phénomène s'explique.

Il n'est pas difficile de comprendre pourquoi. Imaginez que la lumière arrive de manière granulaire, en grains d'énergie. Un électron est heurté par un grain. Il sera éjecté de son atome si le grain a beaucoup d'énergie, et non pas s'il y a de nombreux grains de faible énergie. Si, comme l'avait supposé Planck, l'énergie de chaque grain est déterminée par la fréquence, le phénomène ne se produit que si la fréquence est suffisamment haute, et non s'il y a beaucoup d'énergie en jeu. C'est comme le fait que, lorsqu'il grêle, ce qui détermine si notre voiture va être marquée ou non n'est pas la quantité totale de grêle tombée, mais la taille de chacun des grêlons. Il peut bien tomber une grêle intense, si tous les grêlons sont petits, ils ne causeront aucun dommage. Ainsi, même si la lumière est très intense, c'est-à-dire s'il y a beaucoup d'énergie, les électrons ne seront pas éjectés de leur atome si la fréquence de la lumière est trop basse. Cela explique pourquoi c'est la couleur, pas l'intensité, qui détermine si l'effet photoélectrique se produira ou non. Ce raisonnement très simple a valu à Einstein le prix Nobel : il est facile de comprendre les choses après que quelqu'un les a déjà comprises. La difficulté, c'est de les comprendre la première fois.

Aujourd'hui, ces paquets d'énergie, ou de lumière, nous les appelons « photons », du grec $\phi\omega\varsigma$, lumière. Les photons sont les grains de lumière, ou les quanta de lumière. Dans l'introduction de son étude, Einstein écrit :

Il me semble que les observations relatives à la fluorescence, à la production des rayons cathodiques, à la radiation électromagnétique qui proviennent d'une boîte ou à d'autres semblables phénomènes liés au processus d'émission ou de transformation de la lumière, auraient pu être comprises plus facilement si l'on émettait l'hypothèse que l'énergie de la lumière est distribuée dans l'espace de façon discontinue.

Ici, je considère l'hypothèse que l'énergie d'un rayon de lumière qui prend son origine à partir d'une source ponctuelle ne va pas se distribuer d'une façon continue sur un espace toujours plus vaste, mais se verra constituée d'un nombre fini de « quanta d'énergie » localisés dans des points de l'espace, qui se déplacent sans subir de division et peuvent être produits ou absorbés comme unité dans leur totalité¹.

Ces lignes, simples et claires, sont l'acte de naissance de la théorie des quanta. Notons le merveilleux « Il me semble » initial, qui rappelle les hésitations de Faraday ou celles de Newton, ou encore l'incertitude de Darwin aux premières pages de *L'Origine des espèces*. Le génie est conscient de la portée des pas importants qu'il accomplit et il est toujours hésitant...

Il existe une relation claire entre le travail d'Einstein sur le mouvement brownien que j'ai examiné au chapitre 1 et ce travail-ci sur les quanta de lumière, tous les deux complétés en 1905. Dans le premier, Einstein était parvenu à trouver la démonstration de l'hypothèse atomiste, c'est-à-dire de la structure granulaire de la matière. Dans le second, il étend cette hypothèse à la lumière : cette dernière aussi doit avoir une structure granulaire.

Initialement, le travail d'Einstein est regardé par ses collègues comme une sottise de jeunesse. Tous louent Einstein pour la théorie de la relativité, mais jugent l'idée des photons farfelue. Ils sont totalement convaincus depuis peu que la lumière est une onde du champ électromagnétique : comment une onde pourrait-elle être constituée de petits grains ? Dans une lettre qui recommande Einstein au ministre allemand, afin qu'on crée pour lui une chaire à Berlin, les physiciens les plus illustres du moment écrivent que le jeune homme est si brillant

qu'on « peut excuser » certaines légèretés comme l'idée des photons. Quelques années plus tard, c'est justement pour avoir compris que les photons existent bel et bien que ces mêmes collègues lui décerneront le Nobel. À petite échelle, la lumière arrive sur une surface comme une petite pluie de particules.

Comprendre comment la lumière peut être *soit* une onde électromagnétique, *soit*, en même temps, un essaim de photons, réclamera toute l'élaboration de la mécanique quantique. Mais la première pierre de la nouvelle théorie a été posée : il existe une *granularité* au cœur de *toutes* les choses, y compris la lumière.

Niels, Werner et Paul

Si Planck est le père naturel de la théorie, c'est Einstein qui en a accouché et l'a fait grandir. Mais comme souvent les enfants, la théorie a ensuite pris son propre envol, et Einstein ne l'a plus reconnue.

Durant les années 1910-1920, c'est le Danois Niels Bohr qui en conduit le développement ([figure 4.1](#)). Bohr étudie la structure des atomes, dont on commençait à entrevoir la nature depuis le début du siècle. Les expériences avaient montré qu'un atome est comparable à un système solaire miniature : la masse est concentrée dans un noyau central pesant, autour duquel tournoient des électrons légers, plus ou moins comme les planètes autour du Soleil. Cette idée, toutefois, ne rendait pas compte d'un caractère simple de la matière : elle est colorée.



Figure 4.1. Niels Bohr.

Le sel est blanc, le poivre noir, le piment rouge. Pourquoi ? En étudiant en détail la lumière émise par les atomes, on déduit que les substances élémentaires ont des couleurs qui les distinguent. Rappelez-vous : Maxwell avait découvert que la couleur est la fréquence de la lumière. Ainsi, la lumière n'est émise par les substances qu'à certaines fréquences. L'ensemble des fréquences qui caractérise une substance donnée s'appelle le « spectre » de cette substance. Un spectre est un ensemble de petites lignes colorées de différentes couleurs, en lesquelles se décompose (à travers un prisme, par exemple) la lumière émise par une substance donnée. Les spectres de quelques éléments sont montrés à la [figure 4.2](#).

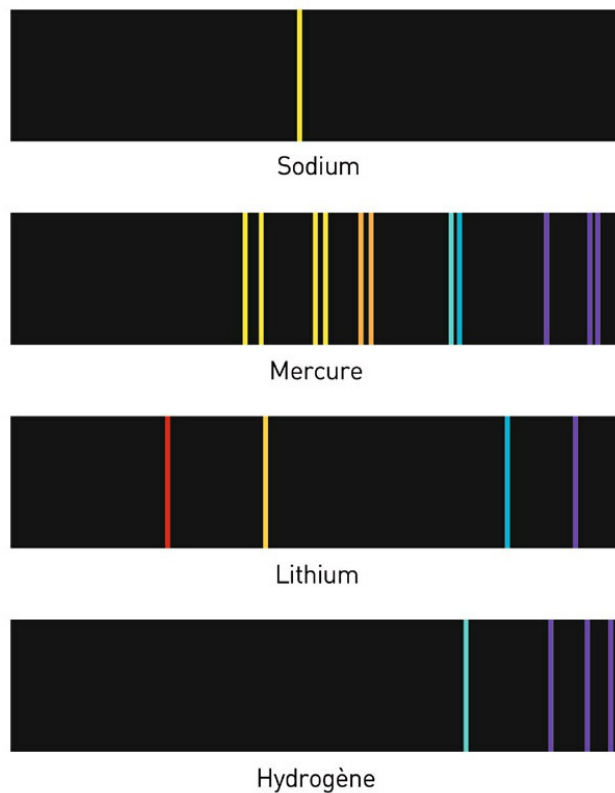


Figure 4.2. Quelques spectres d'éléments.

Les spectres de nombreuses substances avaient été étudiés et catalogués dans les laboratoires de physique au début du siècle, et personne ne savait rendre compte du fait que chaque substance avait tel ou tel spectre. Qu'est-ce qui détermine la position de ces lignes ?

La couleur est la fréquence de la lumière, c'est-à-dire le nombre d'oscillations par seconde des lignes de Faraday. À son tour, celle-ci est déterminée par la vibration des charges électriques qui engendrent la lumière, et ces charges, pour la matière, sont les électrons qui tournent autour des atomes. Donc, en étudiant les spectres, on peut comprendre comment vibrent les électrons autour des noyaux et, inversement, en calculant les fréquences possibles avec lesquelles un électron tourne autour de son noyau, on devrait, en théorie, pouvoir calculer, et donc

prévoir, le spectre de n'importe quel atome. C'était facile à dire, sauf que personne n'y parvenait. Et même cela paraissait vraiment impossible, car, à en croire la mécanique de Newton, un électron peut tourner autour de son noyau à *n'importe quelle* vitesse, et donc émettre de la lumière à *n'importe quelle* fréquence. Mais alors, pourquoi la lumière émise par un atome ne contient-elle pas *toutes* les couleurs, mais seulement quelques couleurs particulières ? Pourquoi les spectres atomiques ne sont-ils pas une suite continue de couleurs, mais sont composés de quelques lignes séparées ? Pourquoi, comme on dit en jargon technique, sont-ils « discrets » au lieu d'être « continus » ? Pendant des décennies, les physiciens semblaient incapables de répondre. Bohr trouve le chemin, au prix d'hypothèses assez tordues.

Bohr comprend que tout s'expliquerait si l'énergie des électrons dans les atomes pouvait elle aussi prendre seulement certaines valeurs « quantifiées ». Certaines valeurs spécifiques, comme le supposaient quelques années auparavant Planck et Einstein pour l'énergie des quanta de lumière. Une fois de plus, la solution est une *granularité*, non de la lumière cette fois, mais de l'énergie des électrons dans les atomes. On commence à comprendre que la granularité de la nature est quelque chose de très général.

Bohr suppose que les électrons ne peuvent se trouver qu'à certaines distances du noyau, c'est-à-dire seulement sur des orbites particulières, dont l'échelle est déterminée par la constante de Planck h , et qu'ils peuvent « sauter » de l'une à l'autre de ces orbites atomiques permises. Ce sont les fameux « sauts quantiques ». Ces deux hypothèses définissent le modèle d'atome de Bohr, duquel on a célébré le centenaire en 2013. À partir de ces deux hypothèses (farfelues, à vrai dire, mais simples), Bohr parvient à calculer tous les spectres de tous les atomes, et même à prévoir correctement des spectres non encore observés. Le succès expérimental de ce modèle simple est vraiment

surprenant. Évidemment, il y a du vrai dans ces hypothèses, même si elles vont à l'encontre de toutes les idées courantes sur la matière et sur la dynamique. Mais pourquoi seulement certaines orbites ? Et pourquoi les électrons sautent-ils ?

Dans l'Institut de Bohr, à Copenhague, on réunit les jeunes esprits les plus brillants du siècle, pour tenter de mettre de l'ordre dans ce fatras de comportements incompréhensibles du monde atomique, et d'en tirer une théorie cohérente. La recherche est longue et pénible, et c'est un jeune Allemand qui va trouver la clé du mystère.

Werner Heisenberg ([figure 4.3](#)) a 25 ans quand il formule, le premier, les équations de la mécanique quantique, comme Einstein a 25 ans quand il écrit ses trois articles déterminants. Et il le fait en se fondant sur des idées qui donnent le tournis.



Figure 4.3. Werner Heisenberg.

L'intuition lui vient une nuit, dans le parc derrière l'Institut de physique de Copenhague. Le jeune Werner se promène, pensif, dans le parc. Il fait très sombre. Seuls quelques pâles lampadaires donnent un faible halo de lumière ici ou là. Ces globes de lumière sont séparés par de larges espaces d'obscurité. Soudain, Heisenberg voit un homme qui passe. Plus exactement, il ne le voit pas passer : il le voit apparaître sous un lampadaire, puis disparaître dans le noir, réapparaître peu après sous un autre lampadaire, avant de disparaître de nouveau dans le noir. Et ainsi de suite, de halo en halo, jusqu'à se fondre dans la nuit. Heisenberg pense que, « évidemment », l'homme ne disparaît et ne réapparaît pas réellement, et qu'on peut reconstituer mentalement sa trajectoire entre deux lampadaires. Après tout, un homme est un objet grand, gros, lourd, et des objets grands, gros et lourds n'apparaissent et ne disparaissent pas comme cela...

Ah ! Ces objets, les grands, gros et lourds, ne disparaissent et ne réapparaissent pas... mais qu'en est-il des électrons ? Voilà l'éclair de génie de Heisenberg. Et si ce « évidemment » n'était plus valable pour les petits objets tels que les électrons ? Et si, effectivement, un électron pouvait disparaître et réapparaître ? Et si c'était cela, les mystérieux sauts quantiques d'une orbite à l'autre qui équilibrent les comptes des spectres, sans qu'on sache pourquoi ? Et si, entre une interaction et une autre, l'électron n'était, littéralement, *nulle part* ?

Et si un électron était quelque chose qui ne se manifeste que lorsqu'il interagit, quand il heurte quelque chose d'autre, et que, entre une interaction et une autre, il n'avait aucune position précise ? Et si avoir une position précise à tout moment était quelque chose qu'on n'acquiert que lorsqu'on est grand, gros et lourd, comme l'homme qui vient de passer tel un fantôme dans l'obscurité avant de se fondre dans la nuit ?

Il faut être un jeune homme d'une vingtaine d'années pour prendre au sérieux de pareilles élucubrations. Il faut être jeune pour songer à en faire une théorie du monde. Et il faut sans doute être jeune pour comprendre ainsi mieux que les autres la structure profonde de la nature. Passé 30 ans, peut-être ne peut-on plus se fier à ses propres intuitions...

Heisenberg rentre chez lui et se plonge dans les calculs. Il en sortira quelque temps plus tard avec une théorie déconcertante : une description fondamentale du mouvement des particules où celles-ci ne sont pas décrites par leur position à tout moment, mais seulement par leur position à *certain*s instants : les instants où elles interagissent avec autre chose.

C'est la seconde pierre de la mécanique quantique qui est trouvée, la clé la plus difficile : le caractère *relationnel* de toute chose. Les électrons n'existent pas toujours. Ils existent seulement lorsqu'ils interagissent. Ils se matérialisent en un lieu lorsqu'ils viennent se heurter à autre chose. Les sauts quantiques d'une orbite à une autre sont leur seul moyen d'être réels : un électron est un ensemble de sauts d'une interaction à une autre. Quand rien ne le perturbe, un électron n'est en aucun lieu. Au lieu d'écrire la position et la vitesse de l'électron, Heisenberg écrit des tables de nombres, des « matrices ». Il multiplie et divise des matrices, qui représentent de possibles interactions de l'électron. Et comme avec un boulier magique de nécromancien, les résultats de ses calculs cadrent parfaitement avec toutes les observations effectuées. Ce sont les premières vraies équations fondamentales de la mécanique quantique. À partir de là, ces équations ne feront que fonctionner, fonctionner, fonctionner. Jusqu'à aujourd'hui – c'est incroyable –, elles ne se sont *jamais* trompées.

Enfin, c'est un autre jeune homme de 25 ans qui a recueilli le premier travail de Heisenberg, qui va prendre en main la nouvelle

théorie et qui va en élaborer tout l'échafaudage mathématique et formel : l'Anglais Paul Adrien Maurice Dirac, considéré par beaucoup comme le plus grand physicien du xx^e siècle après Einstein ([figure 4.4](#)).



Figure 4.4. Paul Dirac

Malgré sa stature scientifique, Dirac est bien moins connu qu'Einstein. Cela est dû en partie à l'abstraction subtile de sa science, et en partie à son caractère déconcertant. Silencieux, très réservé, incapable d'exprimer des émotions ou des sentiments, souvent incapable de reconnaître les visages de personnes connues, incapable même de tenir une conversation normale, voire de comprendre des questions simples, il frôlait l'autisme et peut-être en franchissait-il le seuil².

Lors d'une de ses conférences, un collègue l'avait interrompu : « Je n'ai pas compris cette formule. » Dirac, après un bref silence, avait repris, imperturbable. L'animateur de la conférence l'avait interrompu en lui demandant de bien vouloir répondre à la question, et Dirac, sincèrement surpris : « Une question ? Quelle question ? Le collègue a

formulé une affirmation, pas une question » (« Je n'ai pas compris cette formule » est une affirmation, pas une question...). Ce n'était pas de la suffisance : l'homme qui voyait les secrets de la nature qui échappaient à tous les autres ne comprenait pas le langage implicite, il ne comprenait pas ses semblables et prenait toutes les phrases au pied de la lettre³. Mais, dans ses mains, la mécanique quantique, de fatras dénaturé d'intuitions, de demi-calculs, de discussions métaphysiques fumeuses et d'équations qui fonctionnent bien on ne sait pourquoi, se transforme en une architecture parfaite : aérienne, simple et très belle. Mais d'une abstraction stratosphérique.

« De tous les physiciens, c'est Dirac qui a l'esprit le plus pur », dit de lui le vieux Bohr. Sa physique est limpide et claire comme un chant. Pour lui, le monde n'est pas fait de choses, il est constitué de constructions mathématiques abstraites qui nous disent ce qui apparaît et comment se comporte ce qui apparaît. Une rencontre magique de logique et d'intuition. Einstein lui-même en a été profondément impressionné : « J'ai des problèmes avec Dirac. Avancer en équilibre sur ce chemin vertigineux entre génie et folie est une entreprise terrible. »

La mécanique quantique de Dirac est celle qu'utilise aujourd'hui ou à laquelle se réfère n'importe quel ingénieur, chimiste ou biologiste moléculaire. Chaque objet y est décrit à partir d'un espace abstrait⁴ et n'a aucune propriété en soi, à part celles qui ne changent jamais, comme la masse. Sa position et sa vitesse, son moment angulaire et son potentiel électrique, etc., ne prennent réalité que lorsqu'il rencontre un autre objet. Ce n'est pas seulement sa position qui n'est pas définie, comme l'avait compris Heisenberg : *aucune* variable de l'objet n'est définie durant la période qui s'étend entre une interaction et la suivante. Le caractère *relationnel* de la théorie devient universel.

Quand elle apparaît soudain dans une interaction avec un autre objet, une variable physique (vitesse, énergie, moment, moment angulaire...) ne prend pas n'importe quelle valeur. Elle ne peut prendre que certaines valeurs et pas d'autres. Dirac fournit la recette générale pour calculer l'ensemble des valeurs que peut prendre une variable physique⁵. Ces valeurs sont l'analogie des spectres de la lumière émise par les atomes. Par analogie avec les lignes des spectres en lesquels se décompose la lumière des substances, première manifestation de ce phénomène, nous appelons aujourd'hui « spectre d'une variable » l'ensemble des valeurs particulières que peut prendre cette variable. Par exemple, le rayon des orbitales des électrons autour des noyaux peut seulement prendre des valeurs précises, celles qu'avait imaginées Bohr.

Ensuite, la théorie donne des informations sur le spectre qui se manifesterà lors de la prochaine interaction, mais seulement de manière probabiliste. Nous ne savons pas avec certitude où l'électron va apparaître, mais nous pouvons calculer la *probabilité* de son apparition ici ou là. C'est un changement radical par rapport à la théorie de Newton, qui permettait, du moins en principe, de prévoir le futur avec certitude. La mécanique quantique apporte la probabilité au cœur de l'évolution des choses. Cet *indéterminisme* est la troisième pierre à la base de la mécanique quantique : la découverte que le hasard agit au niveau de l'atome. Tandis que la physique newtonienne permet de prédire avec exactitude le futur, si nous connaissons suffisamment bien les données initiales et si nous sommes en mesure de faire les calculs, la mécanique quantique nous permet seulement de calculer la *probabilité* d'un fait. Cette absence de déterminisme à très petite échelle est intrinsèque à la nature. Un électron n'est pas déterminé à se mouvoir vers la droite ou vers la gauche, il le fait au hasard. Le déterminisme apparent du monde macroscopique est dû

seulement au fait que ce hasard, que ce caractère aléatoire au niveau microscopique, engendre des fluctuations trop petites pour être perçues dans la vie quotidienne.

La mécanique quantique de Dirac permet ainsi de faire deux choses. La première est de calculer *quelles valeurs* peut prendre une variable physique. C'est le calcul du spectre d'une variable, qui saisit la *granularité* au cœur de la nature des choses, et il est extrêmement général : il vaut pour n'importe quelle variable physique. Les valeurs calculées sont celles qu'une variable peut prendre au moment où l'objet (un atome, un champ électrique, une molécule, un pendule, un caillou, une étoile...) interagit avec autre chose (*relationnisme*). La seconde chose que la mécanique quantique de Dirac permet de faire est de calculer la *probabilité* que l'objet manifeste telle ou telle valeur d'une variable, lors de sa prochaine interaction. C'est le calcul d'une amplitude de probabilité. Cette probabilité exprime la troisième caractéristique clé de la théorie : l'*indéterminisme*, c'est-à-dire le fait de donner des prédictions non pas univoques, mais seulement probabilistes.

Voilà ce qu'est la mécanique quantique de Dirac : une recette pour calculer le spectre des variables et une recette pour calculer la probabilité pour que telle ou telle valeur dans le spectre se manifeste lors d'une interaction. C'est tout. Ce qui se produit entre une interaction et une autre est quelque chose qui, selon cette théorie, n'existe pas.

La probabilité de trouver un électron, ou n'importe quelle autre particule, en tel ou tel point de l'espace peut être imaginée comme un nuage diffus, plus dense là où la probabilité de voir l'électron est plus élevée. Parfois, il est utile de visualiser ce nuage comme s'il s'agissait d'un objet réel. Par exemple, le nuage qui représente un électron autour de son noyau nous dit où il est le plus probable que l'électron

apparaisse si nous essayons de le regarder : il s'agit des « orbitales » atomiques⁶.

L'efficacité de cette théorie se révèle vite extraordinaire. Si, aujourd'hui, nous fabriquons des ordinateurs, si nous avons une chimie et une biologie moléculaire avancées, si nous disposons du laser et des semi-conducteurs, c'est grâce à la mécanique quantique. Pendant un certain nombre de décennies, pour les physiciens, c'était toujours Noël : à chaque nouveau problème, la réponse suivait aussitôt grâce aux équations de la mécanique quantique, et c'était toujours la bonne. Même la réponse aux problèmes qui semblaient les plus ardues. Un exemple suffira.

La matière qui nous entoure est faite de mille substances diverses, mais, au cours des XVIII^e et XIX^e siècles, les chimistes ont compris qu'il s'agit toujours et seulement de combinaisons d'une centaine d'éléments simples : hydrogène, hélium, oxygène, etc., jusqu'à l'uranium et au-delà. Mendeleïev a classé par ordre (de poids) ces éléments et a compilé le célèbre tableau périodique, accroché au mur de nombreuses salles de classe et qui résume les propriétés des éléments dont est fait le monde, non seulement sur la Terre, mais dans toutes les galaxies. Pourquoi donc précisément ces éléments-là ? Pourquoi cette périodicité ? Pourquoi chaque élément a-t-il certaines propriétés et pas d'autres ? Pourquoi, par exemple, certains éléments se combinent-ils facilement et d'autres pas ? Quel est le secret de la curieuse structure du tableau périodique de Mendeleïev ?

Eh bien, prenez l'équation de la mécanique quantique qui détermine la forme des orbitales de l'électron. Cette équation a un certain nombre de solutions et ces solutions correspondent exactement : à l'hydrogène, à l'hélium, à l'oxygène et aux autres éléments ! Le tableau périodique est structuré exactement comme ces solutions. Les propriétés des éléments, et tout le reste, suivent comme

solution de cette équation ! En d'autres termes, la mécanique quantique déchiffre parfaitement le secret de la structure du tableau périodique des éléments.

Le vieux rêve de Pythagore et de Platon de décrire toutes les substances du monde par une seule formule est réalisé. L'infinie complexité de la chimie est donnée par les solutions d'une équation ! Toute la chimie émerge de cette seule équation. Et ce n'est là qu'une des innombrables applications de la mécanique quantique.

Champs et particules, c'est la même chose

Deux ans seulement après avoir complété la formulation générale de la mécanique quantique, Dirac se rend compte que celle-ci peut être appliquée directement aux champs, comme le champ électromagnétique, et qu'on peut la rendre cohérente avec la relativité restreinte. (La rendre cohérente avec la relativité *générale* sera bien plus compliqué ; c'est le sujet des chapitres suivants.) Ce faisant, il découvre une profonde simplification de notre description de la nature : la convergence entre la notion de particule utilisée par Newton et celle de champ introduite par Faraday.

Le nuage de probabilité qui accompagne les électrons entre une interaction et une autre est un peu semblable à un champ. Mais les champs de Faraday et Maxwell, à leur tour, sont faits de grains : les photons. Non seulement les particules sont en un certain sens diffuses dans l'espace comme des champs, mais les champs eux aussi interagissent comme des particules. Les notions de champ et de particule, séparées par Faraday et Maxwell, finissent par rejoindre la mécanique quantique.

La manière dont cela se produit dans la théorie est très élégante : les équations de Dirac déterminent quelles valeurs peut prendre n'importe quelle variable. Appliquées à l'énergie des lignes de Faraday, elles nous disent que cette énergie peut prendre seulement certaines valeurs et non d'autres. L'énergie du champ électromagnétique peut prendre seulement certaines valeurs, aussi se comporte-t-elle comme un ensemble de *paquets* d'énergie. Il s'agit exactement des quanta d'énergie de Planck et d'Einstein. Le cercle se referme. Les équations de la théorie, écrites par Dirac, rendent compte de la granularité de la lumière supposée par Planck et par Einstein.

Les ondes électromagnétiques sont bien des vibrations des lignes de Faraday ; mais aussi, à petite échelle, des essaims de photons. Lorsqu'elles interagissent avec autre chose, comme dans l'effet photoélectrique, elles se montrent comme des essaims de particules : sur notre œil, la lumière pleut en gouttes distinctes, en photons isolés. Les photons sont les quanta du champ électromagnétique.

D'autre part, les électrons eux aussi et toutes les particules dont est fait le monde sont des quanta d'un champ : un « champ quantique » semblable à celui de Faraday et de Maxwell, soumis à la granularité et à la probabilité quantiques. Dirac a ainsi écrit l'équation du champ des électrons et des autres particules élémentaires⁷. La différence entre champs et particules introduite par Faraday est largement vouée à disparaître.

La forme générale de la théorie quantique compatible avec la relativité restreinte est appelée « théorie quantique des champs » et est à la base de la physique des particules actuelle. Les particules sont des quanta d'un champ, comme les photons sont des quanta du champ électromagnétique, et tous les champs montrent cette structure granulaire dans leurs interactions⁸.

Au cours du xx^e siècle, la liste des champs fondamentaux a été mise au point et nous disposons aujourd'hui d'une théorie, appelée « modèle standard des particules élémentaires », qui semble décrire correctement tout ce que nous voyons, à part la gravité⁹, dans le domaine de la théorie quantique des champs. La mise au point de ce modèle a occupé les physiciens pendant une bonne partie du siècle dernier, et représente en soi une belle aventure. Cependant, je n'entends pas raconter cette partie de l'histoire : c'est à la gravité quantique que je voudrais arriver.

Le modèle standard a été complété autour des années 1970. Il y a une quinzaine de champs dont les excitations sont les particules élémentaires (électrons, quarks, muons, neutrinos, la particule de Higgs et quelques autres), plus quelques champs, comme le champ électromagnétique, qui décrivent la force électromagnétique et les autres forces qui agissent à échelle nucléaire.

Au début, le modèle standard n'était guère pris au sérieux, à cause de son aspect un peu rafistolé, éloigné de la simplicité aérienne de la relativité générale, des équations de Maxwell ou de Dirac. Mais contre toute attente, toutes ses prédictions ont été confirmées. Depuis plus de trente ans, toutes les expériences de physique des particules vont dans ce sens. Parmi les premières et les plus importantes de ces expériences, il y a eu la révélation des quanta – effectuée par une équipe dirigée par l'Italien Carlo Rubbia – d'un des champs (les particules Z et W), qui a valu le Nobel à Rubbia en 1984. Le dernier exemple en date a été la révélation du boson de Higgs, qui a fait sensation en 2013. Le boson de Higgs est un des champs du modèle standard, introduit pour faire fonctionner la théorie, et il paraissait assez artificiel ; en revanche, la particule de Higgs, c'est-à-dire le quanta de ce champ, a été observée et a bien les propriétés prédites par le modèle standard¹⁰. (Le fait qu'elle ait été appelée « particule de Dieu » est tellement idiot qu'il ne mérite

aucun commentaire.) Bref, le modèle standard élaboré dans le contexte précis de la mécanique quantique s'est révélé, malgré son nom si peu prétentieux, être un triomphe.

La mécanique quantique, avec ses champs/particules, offre aujourd'hui une excellente description de la nature. Le monde n'est pas fait de champs et de particules, mais d'un même type d'objet, le champ quantique. Non plus de particules qui se meuvent dans l'espace au fil du temps, mais de champs quantiques au sein desquels des événements élémentaires se déroulent dans l'espace-temps. Le monde est curieux, mais simple ([figure 4.5](#)).

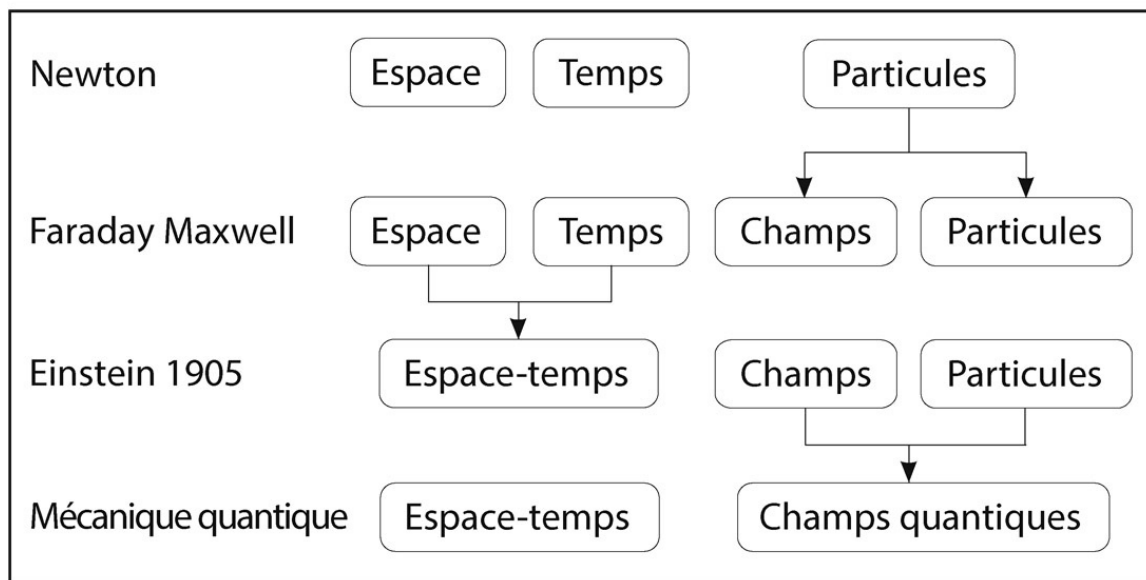


Figure 4.5. De quoi le monde est-il fait ?

Quanta 1 : l'information est finie

Le moment est venu de dresser le bilan de ce que nous dit exactement la mécanique quantique sur le monde. L'exercice n'est pas facile, car il s'agit d'une théorie conceptuellement peu claire et plusieurs questions restent controversées, mais il est nécessaire si l'on veut un peu de clarté pour avancer. Je crois que la mécanique quantique nous a permis de comprendre trois aspects de la nature des choses : granularité, indéterminisme et relationnisme. Voyons cela de plus près.

Le premier aspect est l'existence d'une *granularité* fondamentale dans la nature. La granularité de la matière et de la lumière est au cœur de la mécanique quantique. Ce n'est pas exactement la même granularité que celle qu'imaginait Démocrite pour la matière. Pour lui, les atomes étaient comme de petits cailloux, tandis que dans la mécanique quantique les particules disparaissent et réapparaissent. Mais le fondement de l'idée d'une granularité substantielle du monde est dans l'atomisme antique, et la mécanique quantique – forte de siècles d'expériences, d'une mathématique puissante et de la grande crédibilité que lui vaut son extraordinaire capacité de faire des prévisions justes – confirme la profondeur de vue sur la nature du grand philosophe d'Abdère.

Supposons que nous fassions des mesures sur un système physique et que nous le trouvions dans un certain état. Par exemple, nous mesurons l'amplitude des oscillations d'un pendule et nous trouvons que l'amplitude a une valeur comprise entre 5 et 6 centimètres (aucune mesure n'est jamais exacte en physique). Avant la mécanique quantique, nous aurions dit que, puisqu'il y a entre 5 et 6 centimètres une infinité de valeurs possibles pour l'amplitude (par exemple, 5,1, ou 5,101, ou 5,101001...), alors il y a une *infinité* d'états de mouvement possibles où le pendule pourrait se trouver : notre ignorance sur le pendule est encore infinie.

En revanche, la mécanique quantique nous dit qu'entre 5 et 6 centimètres il y a un nombre *fini* de valeurs possibles pour l'amplitude ; ainsi, notre information manquante sur le pendule est *finie*.

Ce discours est très général¹¹. Donc, le premier sens profond de la mécanique quantique est d'établir une limite à l'*information* qui peut exister dans un système : au nombre d'états distincts dans lesquels un système peut se trouver. Cette limitation de l'infini, cette granularité profonde de la nature, entrevue par Démocrite, est le premier aspect central de la théorie. La constante de Planck h fixe l'échelle élémentaire de cette granularité.

Quanta 2 : indéterminisme

Le monde est une succession d'événements quantiques discrets, granulaires, individuels : ce sont des interactions individuelles d'un système physique avec un autre. Un électron, un quantum d'un champ, un photon ne suivent pas une trajectoire dans l'espace, mais apparaissent en un lieu donné et à un moment donné lorsqu'ils entrent en collision avec autre chose. Où et quand apparaîtront-ils ? Nous n'avons aucun moyen de le prévoir avec certitude. La mécanique quantique introduit un *déterminisme* élémentaire au cœur du monde. Le futur est purement imprévisible. Tel est le deuxième enseignement fondamental de la mécanique quantique.

À cause de cet indéterminisme, le monde décrit par la mécanique quantique est un monde où les choses sont soumises continuellement à un mouvement fortuit. Toutes les variables fluctuent sans arrêt, comme si, à petite échelle, tout était toujours en vibration. Nous ne voyons pas ces fluctuations omniprésentes parce qu'elles sont petites et invisibles

quand nous les observons à l'échelle des corps macroscopiques. Un caillou nous paraît immobile. Mais si nous pouvions observer ses atomes, nous les verrions tantôt ici, tantôt là, continuellement, en perpétuelle agitation. La mécanique quantique nous révèle que, plus nous regardons le monde en détail, moins il est constant. C'est une fluctuation continue, un pullulement continu microscopique de micro-événements. Le monde n'est pas constitué de petits cailloux, mais d'une vibration, d'un pullulement.

L'atomisme antique avait aussi anticipé cet aspect de la physique moderne : l'apparition de lois probabilistes à un niveau profond du réel. Démocrite pensait (comme Newton) que le mouvement des atomes était déterminé de façon rigoureuse par les heurts subis. Mais son successeur dans l'atomisme, Épicure, corrige le déterminisme rigide de son maître et introduit l'indétermination dans l'atomisme antique, exactement comme Heisenberg introduit l'indétermination dans l'atomisme déterministe de Newton. Pour Épicure, les atomes peuvent parfois, au hasard, dévier de leur course. Lucrèce le dit de très belle façon : cette déviation se produit « *incerto tempore... incertisque locis* ¹² », en un temps incertain, en des lieux incertains. Le même indéterminisme, la même réapparition de la probabilité à un profond niveau, telle est la deuxième découverte clé sur le monde effectuée par la mécanique quantique.

Mais comment peut-on calculer la probabilité qu'un électron, en une certaine position initiale A, réapparaîtra après un certain temps en telle ou telle autre position finale B ?

Richard Feynman, auquel j'ai déjà fait allusion, a trouvé dans les années 1950 une façon extrêmement suggestive de faire ce calcul : il faut considérer *tous* les parcours possibles de A à B, c'est-à-dire toutes les trajectoires possibles que l'électron peut suivre (droites, courbes, en zigzag...) ; pour chaque parcours, on peut en calculer un certain

nombre ; la somme de tous ces nombres permet ensuite de déterminer la probabilité. Il n'est pas utile, ici, de détailler ce comptage : l'important, c'est que tout se passe comme si l'électron, pour aller de A à B, empruntait « toutes les trajectoires possibles », c'est-à-dire comme s'il s'ouvrait en un nuage, pour ensuite converger mystérieusement sur le point B, où il entre de nouveau en collision avec autre chose (figure 4.6).

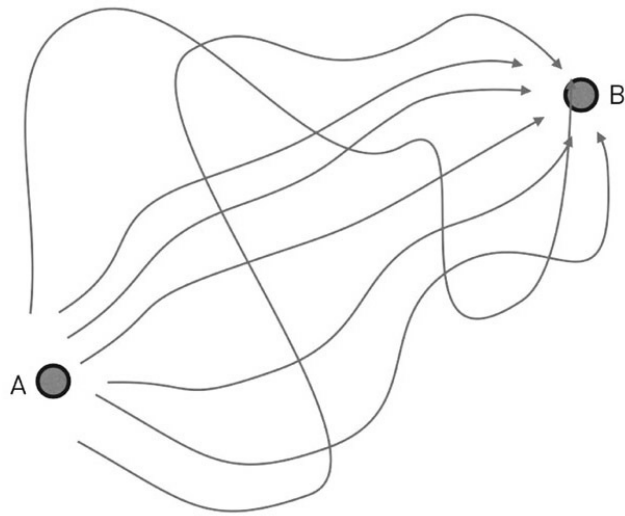


Figure 4.6. Pour aller de A à B, un électron se comporte comme s'il empruntait *tous* les chemins possibles.

Cette façon de calculer la probabilité des événements quantiques est appelée « somme sur les chemins » de Feynman¹³ ; nous verrons qu'elle joue un rôle dans la gravité quantique.

Quanta 3 : la réalité est relation

Enfin, la mécanique quantique a effectué une troisième découverte sur le monde – la plus profonde et la plus difficile – et celle-là n'avait pas été anticipée du tout par l'atomisme antique.

La théorie ne décrit pas comment les choses « sont », mais comment elles se produisent et comment elles influent les unes sur les autres. Elle ne décrit pas où est une particule, mais où cette particule apparaît grâce aux autres. Le monde des choses existantes est réduit au monde des interactions possibles. La réalité est réduite à de l'interaction. La réalité est réduite à de la relation ¹⁴.

En un certain sens, il s'agit là seulement d'une extension très radicale de la relativité. Déjà Aristote avait souligné le fait que nous percevons seulement des vitesses *relatives*. Par exemple, à bord d'un navire, nous évaluons notre vitesse par rapport au navire, et sur la Terre, nous évaluons la vitesse par rapport à la Terre. Galilée s'était rendu compte que c'est la raison pour laquelle la Terre peut se mouvoir par rapport au Soleil sans que nous nous en apercevions directement. La vitesse, avait-il compris, n'est pas la propriété d'un objet isolé, mais une propriété du mouvement d'un objet *par rapport à un autre objet*. Einstein a étendu la notion de relativité au temps également : nous pouvons dire que deux faits sont simultanés relativement à un état de mouvement de l'un d'eux. La mécanique quantique étend cette relativité de façon extrêmement radicale : toutes les caractéristiques d'un objet n'existent que par rapport à d'autres objets. C'est seulement dans les relations que se dessinent les événements de la nature.

Il n'y a pas de réalité, dans le monde décrit par la mécanique quantique, sans *relation* entre systèmes physiques. Ce ne sont pas les choses qui peuvent entrer en relation, ce sont les relations qui fondent la notion de « chose ». Le monde de la mécanique quantique n'est pas un monde d'objets : c'est un monde d'événements élémentaires, et les choses se construisent sur le devenir de ces événements élémentaires.

C'est ce qu'écrivait dans les années 1950 le philosophe Nelson Goodman, en usant d'une très belle expression : « Un objet est un processus monotone », un processus qui se répète égal à lui-même pendant un moment. Un caillou est une vibration de quanta qui maintient sa structure pendant un moment, comme une vague maintient son identité avant de se fondre de nouveau dans la mer.

Qu'est-ce qu'une vague, qui se propage sur l'eau sans rien transporter, si ce n'est sa propre histoire ? Une vague n'est pas un objet, au sens où elle n'est pas formée par de la matière qui demeure. Et les atomes de notre corps nous quittent eux aussi. Comme les vagues et comme tous les objets, nous sommes un flux d'événements, nous sommes des processus qui, durant un temps bref, sont monotones...

La mécanique quantique ne décrit pas des objets, mais des processus et des faits qui sont des interactions entre des processus.

En résumé, la mécanique quantique est la découverte de trois aspects du monde :

- La *granularité*. L'information qui est dans l'état d'un système est finie et limitée par la constante de Planck.
- L'*indéterminisme*. Le futur n'est pas déterminé de manière univoque par le passé. Même les régularités les plus rigides parmi celles que nous voyons sont en réalité seulement statistiques.
- Le *relationnisme*. Les événements de la nature sont toujours des interactions. Tous les événements d'un système sont en relation avec un autre système.

La mécanique quantique nous enseigne à ne pas penser au monde en termes de choses qui sont dans tel ou tel état, mais en termes de processus. Un processus est le passage d'une interaction à une autre. Les propriétés des choses se manifestent de façon *granulaire* seulement au moment de l'interaction, c'est-à-dire aux bords du processus, et ne

sont telles qu'*en relation* à d'autres choses ; elles ne peuvent pas être prévues de façon univoque, mais seulement de façon *probabiliste*.

Telle est la plongée dans les profondeurs de la nature des choses accomplie principalement par Bohr, Heisenberg et Dirac.

Mais comprenons-nous vraiment ?

Certes, la mécanique quantique est un triomphe d'efficacité. Mais... es-tu sûr, astucieux lecteur, d'avoir bien compris ce que dit la mécanique quantique ? Un électron n'est nulle part quand il n'interagit pas... Hmm... Cela ne te paraît-il pas plutôt absurde ?

Cela paraissait absurde aussi à Einstein.

D'un côté, Einstein proposait Werner Heisenberg et Paul Dirac pour le Nobel, en reconnaissant qu'ils avaient compris quelque chose de fondamental. Mais, de l'autre, il ne perdait pas une occasion de grommeler que, cependant, on ne comprenait pas grand-chose avec cette vision du monde.

Les jeunes lions de la bande de Copenhague étaient consternés : comment, lui, Einstein, leur père spirituel, l'homme qui avait eu le courage de penser l'impensable, à présent reculait et avait peur de ce nouveau saut dans l'inconnu, qu'il avait lui-même enclenché ? Lui, Einstein, qui nous avait enseigné que le temps n'est pas universel et que l'espace est courbe, lui disait à présent que le monde ne peut pas être aussi étrange ?

Niels Bohr, patiemment, expliquait à Einstein les nouvelles idées. Einstein objectait. Bohr, à la fin, réussissait toujours à trouver la réponse, à ruiner ses objections. Le dialogue a continué pendant des années, à travers des conférences, des lettres, des articles... Einstein imaginait des expériences mentales pour montrer que les nouvelles

idées étaient contradictoires. « Imaginons une boîte pleine de lumière, d'où nous laissons sortir un bref instant un seul photon... », ainsi commençait un de ses fameux exemples (figure 4.7)¹⁵.

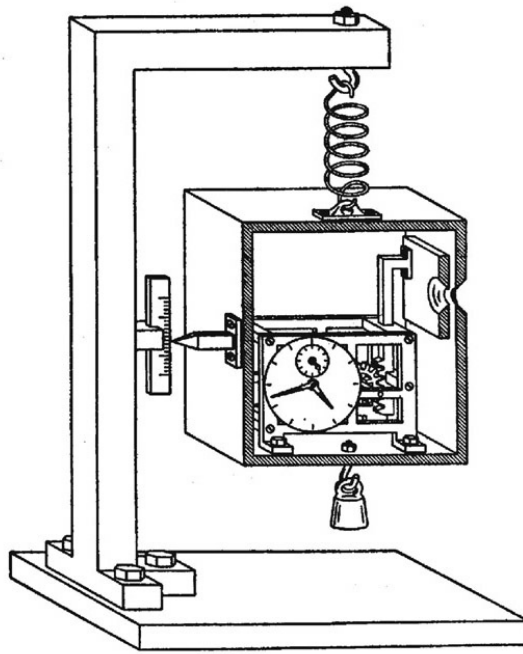


Figure 4.7. La « boîte de lumière » de l'expérience de pensée d'Einstein, dans le dessin original de Bohr.

Au cours de l'échange, les deux géants ont dû reculer et changer d'idées. Einstein a dû reconnaître que, effectivement, il n'y avait aucune contradiction dans les idées nouvelles. Mais Bohr a dû reconnaître que les choses n'étaient pas aussi simples et claires qu'il le pensait au départ. Einstein ne voulait pas céder sur un point clé à ses yeux : il existe une réalité objective indépendante des interactions entre les choses ; en d'autres termes, il ne pouvait admettre l'aspect relationnel de la théorie, le fait que les choses se manifestent

seulement dans les interactions. Bohr ne voulait pas céder sur la validité de la manière profondément nouvelle de la nouvelle théorie de concevoir le réel. Einstein a fini par accepter le fait que la théorie représente un gigantesque pas en avant dans la compréhension du monde, et qu'elle est cohérente, tout en restant convaincu que les choses ne peuvent pas être aussi étranges et que, « derrière », il doit y avoir une explication plus rationnelle.

Un siècle s'est écoulé, et nous en sommes toujours au même point. Richard Feynman, qui mieux que tout autre a su utiliser et manier cette théorie, a écrit : « On peut dire que personne ne comprend vraiment la mécanique quantique. »

Les équations de la théorie et leurs conséquences sont utilisées de manière routinière par les physiciens, les ingénieurs, les chimistes et les biologistes, dans les domaines les plus divers. Mais elles restent mystérieuses : elles ne décrivent pas ce qui arrive à un système physique, mais seulement comment un système physique vient influencer un autre système physique. Qu'est-ce que cela signifie ?

Cela signifie-t-il que la réalité essentielle d'un système qui n'interagit pas est indescriptible ? Ou seulement qu'il manque un bout de l'histoire ? Ou – c'est mon opinion – que nous devons accepter l'idée que la réalité n'est qu'interactions ?

Physiciens et philosophes continuent à s'interroger sur ce que signifie vraiment la théorie, et, ces dernières années, les articles et les colloques sur la question se sont multipliés. Qu'est-ce que la théorie des quanta, un siècle après sa naissance ? Une extraordinaire plongée en profondeur dans la nature de la réalité ? Une méprise, qui fonctionne par hasard ? Un morceau incomplet du puzzle ? Ou l'indice de quelque chose de profond que nous n'avons pas encore bien assimilé et qui concerne la structure du monde ?

L'interprétation de la mécanique quantique que j'ai présentée ici est celle qui me semble la moins irrationnelle. Elle est appelée « interprétation relationnelle » et elle a été discutée aussi par d'éminents philosophes comme Bas Van Fraassen, Mauro Dorato et, en France, Michel Bitbol¹⁶. Mais il n'y a pas de consensus sur la façon de penser la mécanique quantique, et d'autres modèles sont discutés par les physiciens et les philosophes. Nous sommes sur le bord de ce que nous ne savons pas, et les opinions divergent.

N'oublions pas que la mécanique quantique n'est qu'une théorie physique et que demain, peut-être, elle sera corrigée par une compréhension du monde encore plus approfondie et différente. Certains aujourd'hui cherchent même à la triturer pour la rendre plus conforme à notre intuition. Il me semble, pour ma part, que son absolu succès empirique devrait nous inciter à la prendre au sérieux et à nous demander moins ce qu'il y a à changer dans la théorie que ce qu'il y a de limité dans notre intuition, qui nous la rend épineuse.

Selon moi, l'obscurité de cette théorie n'est pas due à la mécanique quantique, mais à notre faculté d'imagination limitée. Lorsque nous essayons de « voir » le monde quantique, nous sommes comme de petites taupes aveugles qui vivent sous terre et à qui on essaie d'expliquer comment sont faites les chaînes de l'Himalaya. Ou comme les hommes enchaînés au fond de la caverne du mythe de Platon (figure 4.8).

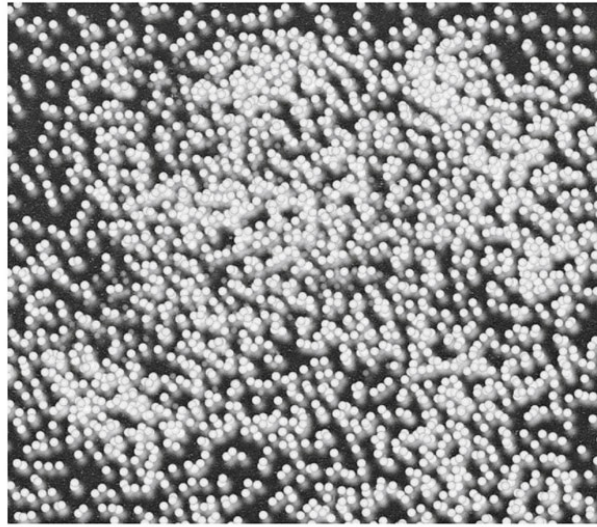


Figure 4.8. La lumière est l'onde d'un champ, mais elle a aussi une structure granulaire.

Quand Einstein meurt, Bohr, son grand rival, a des propos d'admiration émouvants. Quand peu de temps après Bohr meurt à son tour, quelqu'un prend une photo du tableau de son bureau : on y voit un dessin. Il représente la « boîte pleine de lumière » des expériences mentales d'Einstein. Jusqu'au bout, la volonté de se confronter et de comprendre davantage. Jusqu'au bout, le doute.

Ce doute continu, qui est la source profonde de la meilleure des sciences.

1. Einstein, « Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt », *Annalen der Physik*, 1905, 17, p. 132-148.

2. Des formes plus ou moins marquées d'autisme sont assez répandues chez les savants (même s'il existe, évidemment, d'excellents scientifiques parfaitement sociables). Cela s'appelle le syndrome d'Asperger, une forme légère d'autisme qui n'interfère pas (trop) avec la vie quotidienne. Le lien entre conditions autistiques et capacités scientifiques a été étudié par les psychologues (cf. par exemple S. Baron-

Cohen *et al.*, « The autism-spectrum quotient (AQ) : Evidence for Asperger syndrome/high-functioning autism, males and females, scientists and mathematicians », *The Journal of Autism and Developmental Disorders*, 2001, 31, 1, p. 5-17). Le travail scientifique, surtout théorique, exige en premier lieu une grande capacité de concentration ainsi que la capacité de suivre de façon passionnée ses propres pensées. Ces dons sont communs chez des personnalités autistes, souvent au détriment des capacités d'empathie et de socialité. Soigner les personnes de leurs étrangetés revient souvent à les priver de leur personnalité et les empêcher de tirer parti de leurs talents propres.

3. On trouvera une belle biographie de Dirac, qui en illustre bien le caractère déconcertant, in G. Farmelo, *The Strangest Man : The Hidden Life of Paul Dirac, Quantum Genius*, Faber and Faber, 2009.

4. Un espace de Hilbert.

5. Ce sont les valeurs propres de l'opérateur associé à la variable en question. L'équation clé est ainsi l'équation des valeurs propres.

6. Le « nuage » qui représente les points de l'espace où il est le plus probable de trouver l'électron est décrit par un objet mathématique appelé « fonction d'onde ». Le physicien autrichien Erwin Schrödinger a écrit une équation qui montre comment cette fonction d'onde évolue dans le temps. Schrödinger avait espéré que l'« onde » permettrait d'expliquer les bizarreries de la mécanique quantique : les ondes, celles de la mer comme les ondes électromagnétiques, sont assez bien comprises. Aujourd'hui encore, certains essaient de comprendre la mécanique quantique en pensant que la réalité est l'onde de Schrödinger. Mais Heisenberg et Dirac y virent une fausse piste. Penser à l'onde de Schrödinger comme à quelque chose de réel, et lui donner trop de poids, n'aide pas à comprendre la théorie ; cela conduit même à une plus grande confusion. La fonction n'est pas dans l'espace physique, mais dans un espace abstrait formé de toutes les configurations possibles du système, ce qui lui fait perdre tout son caractère intuitif.

Mais la raison principale pour laquelle l'onde de Schrödinger n'est pas une bonne image de la réalité tient à ce que, lorsque l'électron entre en collision avec autre chose, il est toujours en un seul point et non dispersé dans l'espace comme une onde. Si l'on pense qu'un électron est une onde, on est bien embarrassé pour expliquer comment cette onde peut se concentrer instantanément en un seul point à chaque collision. L'onde de Schrödinger n'est pas une représentation utile de la réalité : c'est un auxiliaire de calcul qui nous permet de prédire avec davantage de précision le lieu où l'électron va réapparaître. La réalité de l'électron n'est pas une onde : c'est cette apparition intermittente dans les collisions, comme l'homme qui apparaissait dans les halos de lumière tandis que le jeune Heisenberg errait pensivement dans la nuit de Copenhague.

7. L'« équation de Dirac ».

8. Cela est vrai en général comme conséquence de la mécanique quantique et de la relativité restreinte.

9. Un phénomène semble irréductible au modèle standard : la « matière noire ». Astrophysiciens et cosmologistes observent dans l'Univers les effets d'une matière qui n'est pas du type de la matière décrite par le modèle standard. Nous ignorons encore bien des choses...

10. Il ne faut pas prendre au sérieux certaines descriptions journalistiques selon lesquelles le boson de Higgs est « l'explication de la masse des particules ». Les particules ont une masse parce qu'elles en ont une, et le boson de Higgs n'explique absolument rien de l'origine de la masse. C'est un point technique : le modèle standard se fonde sur certaines symétries, lesquelles semblaient permettre seulement des particules sans masse, mais Higgs s'est aperçu qu'on peut avoir soit les symétries, soit la masse, pourvu que celle-ci entre dans une forme indirecte, à travers les interactions avec un champ appelé aujourd'hui, précisément, champ de Higgs. Comme chaque champ a ses particules, il fallait donc qu'il y ait une « particule de Higgs » correspondante : elle a été trouvée en 2013.

11. Une région finie de l'espace des phases, c'est-à-dire de l'espace des états possibles d'un système, comprend un nombre *infini* d'états classiques distincts, mais correspond *toujours* à un nombre *fini* d'états quantiques orthogonaux. Ce nombre est donné par le volume de la région divisé par la constante de Planck élevée au nombre des degrés de liberté. Ce résultat est complètement général.

12. Lucrèce, *De rerum natura*, II, 218.

13. Ou « intégrale de Feynman ». La probabilité d'aller de A à B est le carré de l'intégrale sur tous les chemins de l'exponentielle de l'action classique du chemin multipliée par i et divisée par la constante de Planck.

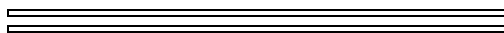
14. On trouvera une discussion approfondie de cette interprétation « relationniste » de la mécanique quantique à l'article « Relational quantum mechanics » de la (très belle) encyclopédie en ligne *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/archives/win2003/entries/rovetli> ; ou encore in C. Rovelli, « Relational quantum mechanics », *International Journal of Theoretical Physics*, 1996, 35, 1637, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9609002>.

15. La boîte contient un mécanisme qui ouvre un instant le trou sur la droite et laisse sortir un photon à un moment précis. En pesant la boîte, il est possible d'en déduire l'énergie du photon disparu. Einstein espérait que cela mettrait en difficulté la mécanique quantique, qui prévoit que temps et énergie ne peuvent pas être tous deux déterminés. La réponse correcte à la remarque d'Einstein, que Bohr ne parvint pas à trouver, mais qui aujourd'hui est claire, est que la position du photon et le poids de la boîte restent liés (« corrélés »), même si le photon est déjà loin.

16. B. Van Fraassen, « Rovelli's world », *Foundations of Physics*, 2010, 40, p. 390-417 ; M. Bitbol, *Physical Relations or Functional Relations ? A Non-metaphysical Construal of Rovelli's Relational Quantum Mechanics*, Philosophy of Science Archives, 2007, <http://philsci-archive.pitt.edu/3506/> ; M. Dorato, *Rovelli's Relational Quantum Mechanics, Monism and Quantum Becoming*, Philosophy of Science Archives, 2013, <http://philsci-archive.pitt.edu/9964/> ; et *Che cos'è il tempo ? Einstein, Gödel e l'esperienza comune*, Carocci, 2013.

TROISIÈME PARTIE

ESPACE QUANTIQUE ET TEMPS RELATIONNEL



Si tu m'as suivi jusque-là, cher lecteur, tu as tous les éléments pour comprendre l'image actuelle du monde suggérée par la physique fondamentale, sa force, ses faiblesses, ses limites.

Il existe un espace-temps, courbe, né on ne sait comment lors d'une gigantesque explosion il y a quatorze milliards d'années, et qui depuis lors s'étend. Cet espace est un objet réel, un champ physique, avec sa dynamique décrite par les équations d'Einstein. L'espace s'incurve sous le poids de la matière, et peut s'effondrer dans un trou noir, quand la matière est trop concentrée.

La matière est répartie en cent milliards de galaxies, chacune comprenant cent milliards d'étoiles, et elle est constituée de champs quantiques, qui se manifestent sous forme de particules, comme les électrons ou les photons, ou bien d'ondes, telles les ondes électromagnétiques qui nous apportent les images de la télévision et la lumière du Soleil et des autres étoiles.

Ces champs quantiques décrivent les atomes, la lumière et tout le contenu de l'Univers. Ce sont des objets bizarres : chacune des particules dont ils sont composés n'apparaît que quand elle interagit avec autre chose, se localisant en un point, tandis que quand elle est seule, elle s'ouvre en un « nuage de probabilités ». Le monde est un grouillement de faits quantiques élémentaires, plongés dans la mer d'un grand espace dynamique houleux.

Avec cette image du monde et avec les quelques intuitions dont elle est formée, nous pouvons décrire presque tout ce que nous voyons.

Presque. Il manque un élément central. Et c'est cet élément que nous cherchons. C'est de lui que parle le reste de l'ouvrage.

En tournant la page, cher lecteur, tu passes de ce que, bien ou mal, nous savons sur le monde de façon très crédible, à ce que nous ne savons

pas encore, mais que nous commençons à entrevoir. Tourner la page, c'est comme sortir de la sécurité de la navette spatiale de nos quasi-certitudes.

CHAPITRE 5

L'espace-temps est quantique

Il y a quelque chose de paradoxal au centre de notre riche connaissance du monde physique. Relativité générale et mécanique quantique, les deux gemmes que nous a laissées le xx^e siècle, ont été prodiges de dons fondamentaux, soit pour comprendre le monde, soit pour faire avancer la technologie. Sur la première ont progressé la cosmologie, l'astrophysique, l'étude des ondes gravitationnelles ou des trous noirs. La seconde est devenue la base des physiques atomique, nucléaire, des particules élémentaires, de la matière condensée et de bien d'autres choses encore.

Mais, entre les deux, il y a quelque chose qui cloche. Les deux théories ne peuvent pas être toutes les deux justes, du moins dans leur forme actuelle, parce qu'elles semblent se contredire l'une l'autre. Le champ gravitationnel est décrit sans tenir compte de la mécanique quantique, sans tenir compte du fait que les champs sont quantifiés, et la mécanique quantique est formulée sans tenir compte de ce que l'espace-temps s'incurve et est soumis aux équations d'Einstein.

Un étudiant qui assiste aux cours de relativité générale le matin et de mécanique quantique l'après-midi ne peut que conclure que ses professeurs sont des sots, ou qu'ils ont oublié de se parler depuis un

siècle : ils lui enseignent deux images du monde en contradiction. Le matin, le monde est un espace-temps *courbe* où tout est *continu* ; l'après-midi, le monde est un espace-temps *plat* où sautent des quanta *discrets* d'énergie.

Le paradoxe est que les théories fonctionnent toutes deux terriblement bien. La nature se comporte avec nous comme ce vieux rabbin chez qui s'étaient rendus deux hommes pour trancher une querelle. Après avoir écouté le premier, le rabbin dit : « Tu as raison. » Le second insiste pour être écouté. Le rabbin l'écoute et lui dit : « Tu as raison toi aussi. » Alors la femme du rabbin, qui écoutait depuis une autre pièce, s'écrie : « Mais ils ne peuvent pas avoir raison tous les deux ! » Le rabbin réfléchit, acquiesce et conclut : « Tu as raison toi aussi. » À chaque expérience et à chaque test, la nature continue à dire « Tu as raison » à la relativité générale comme à la mécanique quantique, malgré les thèses opposées sur lesquelles les deux théories semblent être fondées. Il est clair que quelque chose nous échappe encore.

Dans de très nombreuses situations physiques, nous pouvons négliger les prédictions spécifiques de la mécanique quantique. La Lune est trop grande pour être sensible à la minuscule granularité quantique et, donc, quand nous décrivons son mouvement, nous pouvons oublier les quanta. D'autre part, un atome est trop léger pour courber l'espace de façon significative. Mais il y a des situations physiques où entrent en jeu tant la courbure de l'espace que la granularité quantique, et là nous n'avons plus de théorie physique efficace.

C'est le cas, par exemple, de l'intérieur des trous noirs. Ou encore de ce qui est arrivé à l'Univers au moment du Big Bang. Plus généralement, nous ne savons pas comment sont faits l'espace et le temps à très petite échelle. Dans tous ces cas, les théories aujourd'hui confirmées deviennent confuses et ne nous disent plus rien : la

mécanique quantique ne parvient pas à traiter de la courbure de l'espace-temps ni la relativité générale à tenir compte des quanta. Voilà l'origine du problème de la gravité quantique.

Mais le problème est plus profond encore. Einstein a compris que l'espace et le temps sont des manifestations d'un champ physique : le champ gravitationnel. Bohr, Heisenberg et Dirac ont compris que tout champ physique est quantique, granulaire, probabiliste, et qu'il se manifeste dans les interactions. Il s'ensuit que l'espace et le temps aussi doivent être des objets quantiques doués de ces étranges propriétés.

Qu'est-ce, alors, qu'un espace quantique ? un temps quantique ? C'est le problème que nous appelons « gravité quantique ».

Un groupe de physiciens théoriques des cinq continents cherche laborieusement à résoudre la question : l'objectif est de trouver une théorie, c'est-à-dire un ensemble d'équations, mais surtout une vision du monde cohérente, où la schizophrénie entre quanta et gravité serait résolue.

Ce n'est pas la première fois que la physique se trouve face à deux théories apparemment contradictoires. Dans des situations similaires, l'effort de synthèse a souvent permis de grands pas en avant dans la compréhension du monde. Newton, par exemple, a découvert la gravitation universelle en combinant la physique galiléenne (la chute des corps) avec la physique des planètes de Kepler. Maxwell et Faraday ont trouvé les équations de l'électromagnétisme en rapprochant tout ce qu'on savait sur l'électricité et sur le magnétisme. Einstein a trouvé la relativité restreinte pour résoudre l'apparent conflit entre la mécanique de Newton et l'électromagnétisme de Maxwell, puis la relativité générale pour résoudre le conflit entre la théorie de la gravité de Newton et sa propre relativité restreinte.

Ainsi, un physicien théorique est heureux quand il découvre un conflit de ce genre : il y voit une chance unique. La bonne question à se

poser est : pouvons-nous élaborer une structure conceptuelle qui soit compatible avec ce que nous avons découvert sur le monde grâce aux *deux* théories ?

Pour comprendre ce que sont l'espace et le temps quantiques, une révision profonde de notre façon de concevoir les choses s'impose. Nous devons repenser la grammaire de notre compréhension du monde, la revoir de fond en comble. Comme cela s'était produit pour Anaximandre – qui avait compris que la Terre flotte dans l'espace et qu'il n'existe ni haut ni bas dans le cosmos – ou pour Copernic – qui avait compris que nous nous déplaçons très vite dans le ciel – ou pour Einstein – qui avait compris que l'espace-temps ressemble à un mollusque et que le temps passe différemment dans des lieux différents –, pour chercher une vision du monde cohérente avec ce que nous avons appris jusque-là, nos idées sur la réalité devront nécessairement changer.

Le premier à se rendre compte de la nécessité de modifier nos bases conceptuelles pour comprendre la gravité quantique a été Matveï Bronstein, une figure romantique et légendaire : un tout jeune Russe qui a vécu sous Staline et qui est mort tragiquement ([figure 5.1](#)).



Figure 5.1. Matvei Bronstein.

Matvei

Matvei était un jeune ami de Lev Landau, lequel, comme je l'ai dit, est devenu le plus grand physicien théorique d'URSS. Plusieurs collègues qui les connaissaient tous deux disaient que le plus brillant des deux était Matvei. Dès que Heisenberg et Dirac ont commencé à établir les bases de la mécanique quantique, Landau, en se trompant, a cru comprendre que le champ électromagnétique était mal défini à cause des quanta. Bohr a aussitôt compris que Landau se trompait, a étudié la question à fond et écrit un long article détaillé pour montrer

que les champs, comme le champ électrique, restent bien définis même en tenant compte des quanta ¹.

Landau a laissé tomber. Mais son jeune ami Matveï s'est intéressé au sujet, en percevant que l'intuition de Landau manquait certes de rigueur, mais qu'elle contenait quelque chose d'important. Il a essayé de reprendre le même raisonnement avec lequel Bohr montrait que le champ électrique quantique était bien défini en tout point de l'espace, mais en l'appliquant au champ gravitationnel, dont quelques années plus tôt Einstein avait écrit les équations. Et là – surprise ! – Landau se révélait avoir raison. Le champ gravitationnel en un point n'est *plus* bien défini, si l'on tient compte des quanta.

Il y a une façon simple de comprendre ce qui se passe. Supposons que nous voulions observer une région de l'espace très, très petite. Pour cela, nous devons placer un objet dans cette région, afin de marquer le point que nous souhaitons considérer : par exemple, nous y plaçons une particule. Mais Heisenberg avait compris qu'on ne peut pas localiser une particule en un point de l'espace de façon précise dans le temps. Le point s'échappe. Plus on cherche à localiser la particule dans une petite région, plus grande sera la vitesse à laquelle elle s'échappera. (C'est le principe d'indétermination de Heisenberg.) Si la particule s'échappe à grande vitesse, cela veut dire qu'elle a beaucoup d'énergie.

Mais rappelons-nous la théorie d'Einstein. L'énergie fait se courber l'espace. Si je concentre *beaucoup* d'énergie dans une région *très* petite, le résultat est que je courbe *trop* l'espace, qui se creuse comme dans un trou noir, comme quand une étoile s'effondre sur elle-même. Mais si la particule sombre dans un trou noir, je ne la vois plus. Je ne peux plus utiliser cette particule pour fixer une région de l'espace, comme je le voulais. Bref, je ne peux pas arriver à mesurer des régions

arbitrairement petites de l'espace, car, si j'essaie de le faire, ces régions disparaissent dans un trou noir.

Cet argument peut être précisé par un peu de mathématique. Le résultat est général : la mécanique quantique et la relativité générale, prises ensemble, impliquent qu'il existe une limite à la divisibilité de l'espace. Au-dessous d'une certaine échelle, il n'y a plus rien d'accessible. Ni même plus rien d'existant.

Quelle est cette échelle ? C'est simple : il suffit de calculer la taille minimale d'une particule avant qu'elle tombe dans son trou noir. La longueur minimale qui existe est d'environ

$$L_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$$

À droite de cette égalité, sous la racine carrée, on retrouve les trois constantes de la nature que nous avons rencontrées : la constante de Newton G , dont j'ai parlé au chapitre 2, qui détermine l'échelle de la force de gravité ; la vitesse de la lumière c , rencontrée au chapitre 3 à propos de la relativité, qui donne l'ouverture du « présent étendu » ; et la constante de Planck $\hbar$, rencontrée au chapitre 4 à propos de la mécanique quantique, qui fixe l'échelle de la granularité quantique². La présence de ces trois constantes confirme que nous regardons quelque chose qui a à voir avec la gravité (G), la relativité (c) et la mécanique quantique ($\hbar$).

La longueur L_P ainsi déterminée s'appelle « longueur de Planck ». Il conviendrait de l'appeler « longueur de Bronstein », mais ainsi va le monde. Elle vaut à peu près un millionième d'un milliardième d'un milliardième d'un milliardième de centimètre (10^{-33} centimètre). Autrement dit, elle est très petite. C'est à cette échelle microscopique que se manifeste la gravité quantique. À cette échelle, l'espace et le

temps changent de nature. Ils deviennent autre chose, un espace et un temps quantiques, et comprendre ce que cela signifie est tout le problème. (Pour donner une idée de l'extrême petitesse des dimensions dont nous parlons, même si nous agrandissions une coquille de noix pour lui donner la taille de l'Univers visible, nous ne verrions pas encore la longueur de Planck : même ainsi considérablement agrandie, elle serait un million de fois plus petite que la coquille de noix initiale.)

Matveï Bronstein comprend tout cela dans les années 1930 et rédige deux brefs mais lumineux articles, où il montre que la mécanique quantique et la relativité générale sont incompatibles avec notre idée usuelle de l'espace comme continuum indéfiniment divisible³.

Il y a cependant un problème. Matveï et Lev sont des communistes sincères. Ils croient à la révolution comme libération de l'homme, comme construction d'une société meilleure, sans injustices, sans les criantes inégalités que nous voyons aujourd'hui s'accroître systématiquement partout dans le monde. Ils ont suivi Lénine avec enthousiasme. Quand Staline s'installe au pouvoir, tous deux sont perplexes, puis critiques, enfin hostiles. Ils écrivent de petits articles critiques... Ce n'est pas là le communisme qu'ils voulaient... Mais les temps sont difficiles. Landau s'en sort, pas facilement, mais il s'en sort.

Matveï, l'année après avoir compris le premier que nos idées sur l'espace et sur le temps doivent changer radicalement, est arrêté par la police de Staline et condamné à mort. Son exécution a lieu le jour même du procès, le 18 février 1938⁴. Il a 30 ans.

John

De nombreux grands physiciens du siècle se sont essayés à résoudre le puzzle de la gravité quantique, après la mort prématurée de Matvei Bronstein. Dirac a consacré au problème la dernière partie de sa vie, en ouvrant des pistes et en introduisant des idées et des techniques sur lesquelles se fonde une grande partie du travail technique actuel en gravité quantique. C'est grâce à ces techniques que nous savons décrire un monde sans temps, comme je l'expliquerai plus loin. Feynman a essayé, en cherchant à adapter à la relativité générale les techniques qu'il avait développées pour les électrons et les photons, mais sans succès : électrons et photons sont des quanta dans l'espace. La gravité quantique est autre chose : il ne suffit pas de décrire des « gravitons » ou des ondes gravitationnelles, c'est l'espace lui-même qui est quantifié.

Plusieurs Nobel ont été décernés à des physiciens qui ont résolu d'autres problèmes, presque par erreur, alors qu'ils cherchaient à démêler le puzzle de la gravité quantique. Par exemple, les deux physiciens néerlandais Gerard 't Hooft et Martinus Veltman ont reçu le Nobel en 1999 pour avoir montré la consistance des théories qu'on utilise aujourd'hui pour décrire les forces nucléaires, mais leur programme de recherche visait à montrer la consistance d'une théorie de gravité quantique. Ils travaillaient sur les théories pour ces autres forces comme... exercice préliminaire. L'« exercice préliminaire » leur a valu le Nobel, mais ils ne sont pas parvenus à montrer la consistance de la gravité quantique.

La liste serait longue, et ferait comme une haie d'honneur aux physiciens théoriques. Ou faut-il dire de déshonneur, vu la série d'échecs enregistrés ? Des années durant se sont succédé des périodes d'enthousiasme et des périodes de frustration. Pourtant, cela n'a pas été stérile. Peu à peu, les idées se sont éclaircies, les impasses ont été explorées et abandonnées, des techniques et des idées générales

renforcées, et les résultats ont commencé à tomber l'un après l'autre. Rappeler ici les très nombreux savants qui ont contribué à cette lente construction collective produirait une liste de noms assez fastidieuse, chacun d'eux ayant apporté son grain de sable ou sa pierre à l'édifice.

Je veux seulement évoquer au moins le merveilleux Chris Isham, mi-philosophe et mi-physicien, éternel gamin, qui a tenu pendant des années les fils de cette recherche collective. C'est en lisant un de ses articles de synthèse sur la question que je me suis passionné pour ce problème. L'article expliquait pourquoi c'était un problème difficile, comment notre conception de l'espace et du temps devait être modifiée, et il dessinait un clair aperçu de toutes les voies qui étaient suivies alors, avec les résultats et les difficultés de chacune. J'étais en troisième année universitaire, et lire quelque chose sur la nécessité de comprendre depuis le début l'espace et le temps m'a fasciné, et cette fascination ne m'a plus quitté depuis lors, même quand l'épais mystère a commencé à se dissiper. Comme le chante Pétrarque : « La plaie ne guérit pas, une fois l'arc détendu. »

La personne qui a contribué plus que nulle autre à accentuer la recherche sur la gravité quantique a été John Wheeler, personnage légendaire de la physique du siècle dernier ([figure 5.2](#)). Élève et collaborateur de Niels Bohr à Copenhague, collaborateur d'Einstein quand celui-ci s'est installé aux États-Unis, il compte parmi ses étudiants des figures comme Richard Feynman. John Wheeler a été au cœur de la physique de tout un siècle. Il était doué d'une imagination prodigieuse. C'est lui qui a inventé et rendu populaire le terme « trou noir » pour les régions de l'espace d'où rien ne peut sortir. Son nom est lié surtout aux recherches, souvent plus intuitives que mathématiques, sur la façon de penser l'espace-temps quantique. Ayant absorbé à fond la leçon de Bronstein, pour qui les propriétés quantiques du champ gravitationnel impliquent une modification de la notion d'espace à

petite échelle, Wheeler a cherché des images pour penser cet espace quantique. Il l'a imaginé comme un nuage de géométries diverses superposées, de même que nous pouvons penser un électron quantique dissous dans un nuage de diverses positions.

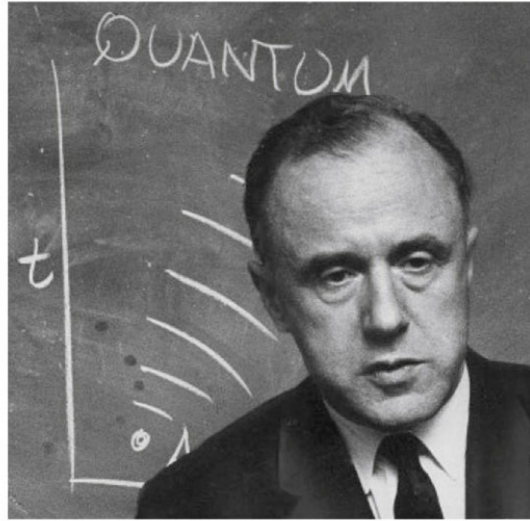


Figure 5.2. John Wheeler.

Imaginez que vous regardez la mer depuis un avion à très haute altitude : vous en voyez une vaste étendue qui ressemble à une table bleue et plane. À présent, vous descendez et vous regardez de plus près. Vous commencez à voir les grandes vagues soulevées par un vent qui souffle fort sur la surface de la mer. Vous descendez encore et vous voyez les vagues se briser et la surface de la mer striée d'écume. Ainsi est l'espace dans l'imagination de John Wheeler⁵. À notre échelle, immensément plus grande que l'échelle de Planck, l'espace est lisse et plat, et décrit par la géométrie euclidienne. Mais si nous descendons à l'échelle de Planck, il se brise et se met à écumer.

Wheeler a cherché un moyen de décrire cet espace agité, cette onde de probabilités de géométries différentes. En 1966, un jeune collègue, qui vivait en Caroline du Nord, Bryce DeWitt, lui a fourni la clé⁶. Wheeler était souvent en voyage et rencontrait ses collaborateurs comme il pouvait. Il demande à Bryce de le rejoindre à l'aéroport de Raleigh Durham, où il doit rester quelques heures pour une correspondance entre deux avions. Bryce le rejoint et lui montre l'équation d'une « fonction d'onde dans l'espace » obtenue en utilisant un simple truc mathématique⁷. Wheeler s'enthousiasme. De leur conversation naît une sorte d'« équation des orbitales » de la relativité générale, équation qui devrait déterminer la probabilité d'observer un espace courbe ou un autre. Longtemps, Wheeler l'a appelée « équation de DeWitt ». Et longtemps, DeWitt l'a appelée « équation de Wheeler ». Tous les autres l'appellent « équation de Wheeler-DeWitt ».

L'idée est excellente et sert d'appui pour tenter d'élaborer la théorie de la gravité quantique, mais l'équation est pleine de problèmes, et ce sont des problèmes sérieux. Avant tout, elle est vraiment mal définie du point de vue mathématique. Si l'on essaie de l'utiliser pour effectuer des calculs, on s'aperçoit vite qu'on obtient des résultats infinis et dépourvus de sens. Si l'on veut vraiment y recourir, il faut la revoir.

Mais, surtout, on ne sait pas comment l'interpréter et on n'en comprend pas la signification exacte. Parmi les aspects les plus déconcertants, il y a le fait que cette équation ne contient plus la variable qui indique le temps. Comment l'utiliser pour calculer l'évolution de quelque chose dans le temps ? Que signifie une théorie physique sans la variable temps ? Pendant des années, la recherche va tourner autour de ces questions, essayant de manier cette équation dans tous les sens pour mieux la définir et comprendre ce qu'elle signifie.

Les premiers pas des boucles

La brume commence à se dissiper vers la fin des années 1980. De manière surprenante, quelques solutions de l'équation de Wheeler-DeWitt apparaissent. Suivent une période de discussions intenses et un grand bouillonnement intellectuel. Ces années-là, je me trouvais d'abord à l'Université de Syracuse, dans l'État de New York, en visite auprès du physicien indien Abhay Ashtekar, puis à l'Université Yale, dans le Connecticut, en visite auprès du physicien américain Lee Smolin. Ashtekar avait contribué à réécrire l'équation de Wheeler-DeWitt sous une forme plus simple, et Smolin, avec Ted Jacobson, de l'Université du Maryland à Washington, comptait parmi les premiers à avoir entrevu ces étranges solutions de l'équation.

Ces solutions avaient une particularité : elles dépendaient de *lignes fermées* dans l'espace. Une ligne fermée est une boucle. On parvenait à écrire une solution de l'équation de Wheeler-DeWitt pour chaque ligne fermée sur elle-même. Qu'est-ce que cela signifiait ? C'est ainsi dans un climat de grand enthousiasme que sont nés les premiers travaux de ce qui allait devenir la théorie de la *gravité quantique à boucles*. Le sens de ces solutions de l'équation de Wheeler-DeWitt s'éclaircit, et sur ces solutions s'élabora peu à peu une théorie cohérente qui, à partir des premières solutions construites, prit le nom de « théorie des boucles ».

Aujourd'hui, ce sont des centaines d'autres scientifiques qui travaillent sur cette théorie, de la Chine à l'Amérique du Sud, de l'Indonésie au Canada. Ce qui est lentement mis sur pied, c'est la théorie qu'on appelle aujourd'hui théorie des boucles ou « gravité quantique à boucles », à laquelle seront consacrés les prochains chapitres. Cette théorie s'est développée dans presque tous les pays avancés du monde. Ce n'est pas la seule direction que la recherche fondamentale explore, mais c'est celle que beaucoup jugent la plus

prometteuse⁸. Le panorama sur la réalité que découvre cette théorie est étrange et déconcertant. Je vais essayer de le décrire dans les chapitres suivants.

1. C'est le célèbre travail sur la mesurabilité des champs de Niels Bohr et Léon Rosenfeld, « Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs », *Mathematiks-fysike Meddelelser*, 1933, 12.

2. Le signe sur le h de la constante de Planck indique que cette constante est divisée par 2π , une notation un peu inutile et idiosyncrasique des physiciens théoriciens : ajouter une petite barre au h « fait très élégant ».

3. Cf. M. Bronstein, « Quantentheorie schwacher Gravitationsfelder », *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*, 1936, 9, p. 140-157 ; « Kvantovanie gravitatsionnykh voln », in *Pi'sma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*, 6, 1936, p. 195-236.

4. Voir F. Gorelik, V. Frenkel, *Matvei Petrovitch Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties*, Birkhauser Verlag, 1994. « Bronstein » était aussi le véritable nom de Trotski.

5. Pour écouter cette métaphore directement de sa bouche, on peut consulter le site <http://www.webofstories.com/play/9542?o=MS>.

6. L'épisode est rappelé par Bryce DeWitt, <http://www.aip.org/history/ohilist/23199.html>.

7. DeWitt remplace des dérivées par des opérateurs de dérivation dans l'équation de Hamilton-Jacobi de la relativité générale (rédigée peu auparavant par Peres). C'est exactement ce qu'avait fait Schrödinger pour écrire son équation, dans son premier travail.

8. L'alternative la plus connue à la gravité quantique à boucles est la théorie des cordes.

CHAPITRE 6

Quanta d'espace

Le chapitre précédent s'est conclu sur les solutions trouvées par Jacobson et Smolin pour l'équation de Wheeler-DeWitt, l'hypothétique équation de base de la gravité quantique. Ces solutions dépendent de lignes qui se referment sur elles-mêmes, ou « boucles ». Quelle est la signification de ces solutions ? Que représentent-elles ?

Vous vous souvenez des lignes de Faraday, qui transportent la force électrique et qui remplissent l'espace, les lignes à l'origine du concept de champ ? Eh bien, les lignes fermées qui apparaissent dans les solutions de l'équation de Wheeler-DeWitt sont des lignes de Faraday dans le champ gravitationnel.

Mais il y a deux nouveautés par rapport aux idées de Faraday.

La première est que, à présent, nous sommes dans la théorie quantique. Dans cette théorie, tout est discret et quantifié. Cela implique que la toile d'araignée continue, infiniment fine, des lignes de Faraday, devient à présent une véritable toile d'araignée, avec un nombre fini de fils distincts. Chaque ligne déterminant une solution décrit un des fils de cette toile d'araignée.

La deuxième nouveauté, celle qui est cruciale, est que nous parlons de gravité, et donc, comme l'a compris Einstein, nous ne parlons pas de

champs immergés dans l'espace, mais de la structure même de l'espace. Les lignes de Faraday du champ gravitationnel quantique sont les fils dont l'espace est tissé. Au début, l'attention de la recherche était toute concentrée sur ces lignes et on se demandait comment elles pouvaient, en s'entrecroisant, donner naissance à notre espace physique tridimensionnel. La [figure 6.1](#) représente une tentative de donner une idée intuitive de la structure discrète de l'espace qui en résulterait.

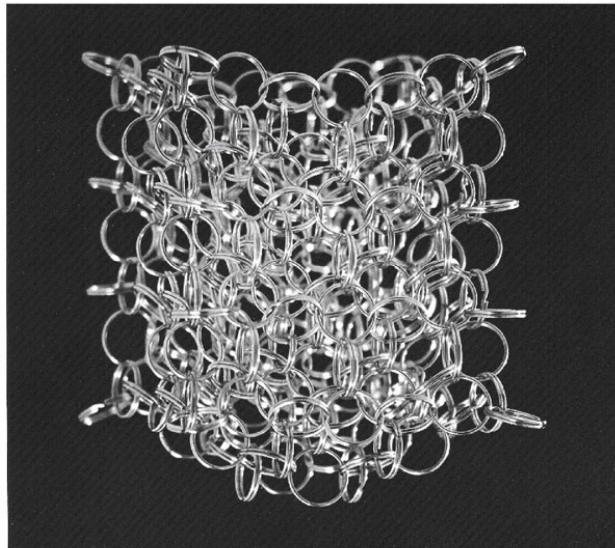


Figure 6.1. Les lignes de force de Faraday quantiques tissent l'espace comme un maillage tridimensionnel de boucles entrecroisées.

Très vite, toutefois, grâce à l'intuition et aux capacités mathématiques de jeunes esprits brillants tels l'Argentin Jorge Pullin et le Polonais Jurek Lewandowski, on commence à entrevoir que la clé pour comprendre la physique de ces solutions réside dans les points où ces lignes se touchent. Ces points sont appelés « nœuds » et les segments entre un nœud et un autre sont appelés liens. Un ensemble

de liens forme ce qu'on appelle un « graphe », c'est-à-dire un ensemble de nœuds reliés par des liens, comme le montre la [figure 6.3](#). Un calcul montre en effet que l'espace physique n'a pas de volume, à moins qu'il n'y ait des nœuds. Autrement dit, c'est dans les nœuds du graphe, et non dans ses liens, que « réside » le volume de l'espace. Les liens « relient » les volumes.

Il faudra plusieurs années avant que le tableau s'éclaire. D'abord, il a fallu transformer la mathématique approximative de l'équation de Wheeler-DeWitt en une structure mathématique cohérente et bien définie pour pouvoir effectuer les calculs. Cela a permis d'obtenir des résultats précis. Le résultat technique qui éclaire le sens physique de ces graphes est le calcul des spectres de volume et d'aire.

Spectres de volume et d'aire

Prenez une région quelconque de l'espace. Par exemple, le volume de la pièce où, lecteur, tu es en train de lire (si tu es dans une pièce). De quelle grandeur est cet espace ? La dimension de l'espace de la pièce est donnée par son volume. Le volume est une quantité géométrique qui dépend de la géométrie de l'espace, mais la géométrie de l'espace – comme l'a compris Einstein et comme je l'ai rapporté au chapitre 3 – est le champ gravitationnel. Le volume est ainsi une variable du champ gravitationnel, c'est « la quantité de champ gravitationnel présente » entre les murs.

Mais le champ gravitationnel est une quantité physique et, comme toutes les quantités physiques, il est soumis aux règles de la mécanique quantique. En particulier, comme toutes les quantités physiques, le volume ne peut pas prendre des valeurs arbitraires, comme je l'ai dit

au chapitre 4. La liste des valeurs possibles s'appelle le « spectre ». Donc, il doit exister un « spectre du volume » ([figure 6.2](#)).

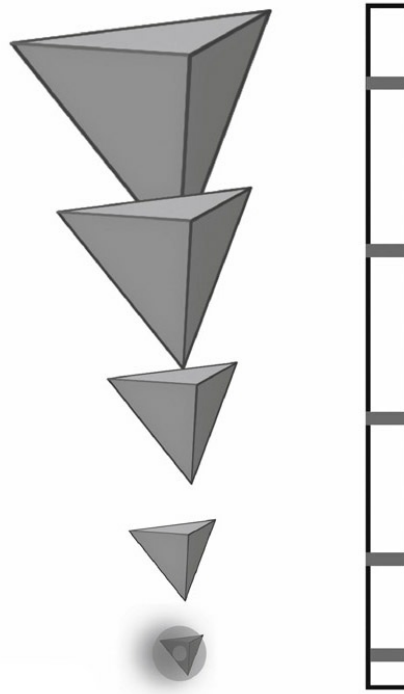


Figure 6.2. Le spectre du volume : seuls certains volumes d'un tétraèdre régulier sont possibles dans la nature. Le plus petit, en bas, est le plus petit volume existant.

Dirac nous a donné la recette pour calculer le spectre de n'importe quelle variable, c'est-à-dire la liste des valeurs possibles que cette variable peut prendre. En appliquant cette recette, nous pouvons calculer le spectre du volume, à savoir toutes les valeurs que le volume peut prendre. Ce calcul a demandé du temps, pour le poser et pour le mener à bien, et il nous a coûté des efforts. Mais il a été achevé au milieu des années 1990, et la réponse, comme on pouvait s'y attendre (Feynman disait qu'il ne faut jamais faire un calcul sans en connaître au préalable le résultat), est que le spectre du volume est discret. C'est-

à-dire que le volume ne peut être formé que par des « paquets discrets ». Un peu comme l'énergie du champ électromagnétique, formée de paquets discrets, les photons.

Les nœuds du graphe représentent les paquets discrets de volume et, comme les photons, ils ne peuvent avoir que certaines dimensions particulières, qu'on peut calculer. Chaque nœud n du graphe a son volume v_n . Les nœuds sont des « quanta » élémentaires dont est fait l'espace. Chaque nœud du graphe est un « grain quantique d'espace ». La structure qui en ressort est illustrée par la [figure 6.3](#).

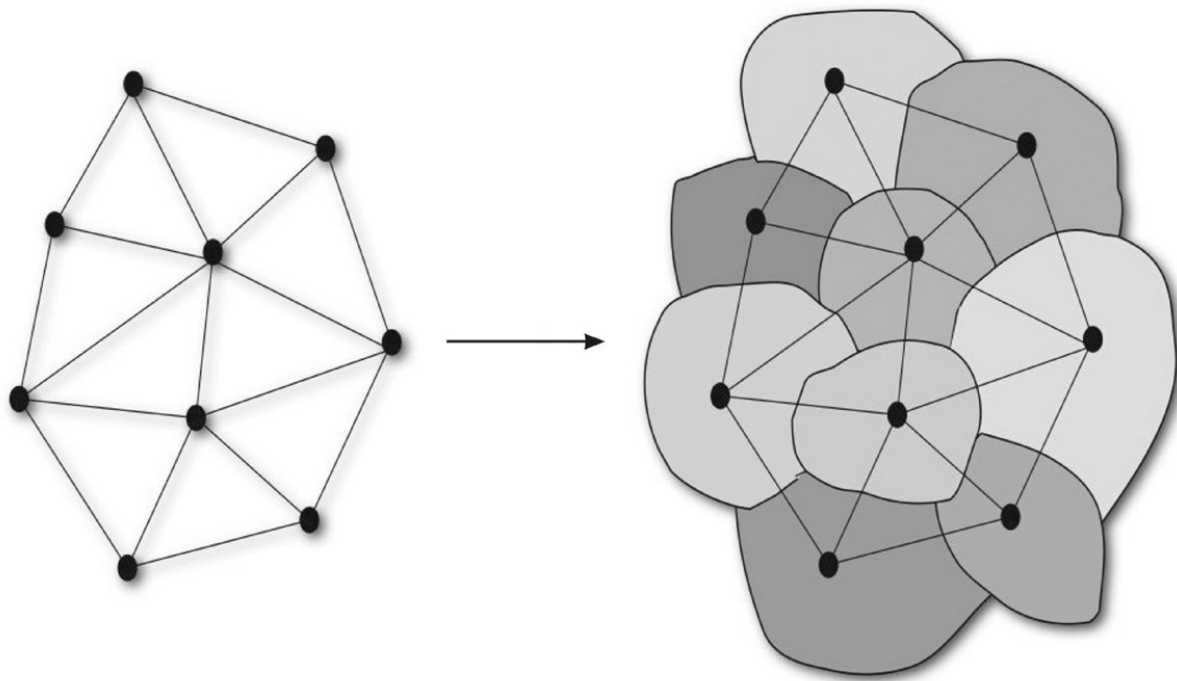


Figure 6.3. À gauche, un graphe formé de nœuds reliés par des liens. À droite, les grains d'espace que le graphe représente. Les liens indiquent les grains adjacents, séparés par des surfaces.

Vous vous rappelez ? Un lien est un quantum individuel d'une ligne de Faraday du champ gravitationnel. À présent, on comprend ce qu'il représente : si vous imaginez deux nœuds comme deux petites « régions » d'espace, ces deux régions seront séparées par une petite surface. La dimension de cette surface est donnée par son *aire*. La seconde quantité, après le volume, qui caractérise ces réseaux quantiques d'espace est donc l'*aire* associée à chaque ligne¹.

Comme le volume, l'*aire* est elle aussi une variable physique et elle a ainsi un spectre qu'on peut calculer à l'aide des recettes de Dirac. Le résultat du calcul est suffisamment simple pour être rapporté ici. Je vous le montre, afin que vous puissiez voir au moins une fois comment fonctionnent les spectres de Dirac. Les valeurs possibles de l'aire A sont données par la formule suivante, où j est un « semi-entier », c'est-à-dire la moitié d'un entier, comme 0, 1/2, 2, 3/2, 3, 5/2...

$$A = 8\pi L_p^2 \sqrt{j(j+1)}$$

Essayons de comprendre cette formule. A est l'aire que peut avoir une surface qui sépare deux grains d'espace. 8 est le chiffre huit, il n'a rien de spécial. π est le *pi grec* qu'on étudie à l'école : la constante qui donne le rapport entre la circonférence et le diamètre de n'importe quel cercle, qui apparaît partout en physique et en mathématiques, je ne sais pourquoi. L_p est la longueur de Planck, la très petite longueur à l'échelle de laquelle se produisent les phénomènes de gravité quantique. L_p^2 est le carré de L_p , c'est-à-dire l'aire (très petite) d'un petit carré au côté égal à la longueur de Planck. Donc $8\pi L_p^2$, c'est simplement une « petite » aire : l'aire d'un petit carré de quelques milliardièmes de milliardième de milliardième de centimètre ($8\pi L_p^2$, c'est environ 10^{-66} cm^2) de côté. La partie intéressante de la formule est la racine carrée et ce qu'elle contient. Le point clé est que j est un semi-

entier, c'est-à-dire qu'il ne peut avoir que des valeurs multiples de $1/2$. Pour chacune d'elles, la racine a une certaine valeur, rapportée (approximativement) dans le [tableau 6.1](#).

Tableau 6.1. Spin et valeur correspondante de l'aire en unités d'aire minimale.

j	$\sqrt{j(j+1)}$
$1/2$	0,8
1	1,4
$3/2$	1,9
2	2,4
$5/2$	2,9
3	3,4
—	—

En multipliant les nombres de la colonne de droite par l'aire $8\pi L_p^2$, on obtient les valeurs possibles de l'aire de la surface. Ces valeurs spéciales rappellent celles qui apparaissent dans l'étude des orbites des électrons dans les atomes, où la mécanique quantique permet seulement certaines orbites. Le point clé est qu'il *n'existe pas* d'autres aires que celles-là. Il n'existe pas une surface qui aurait par exemple une aire d'un dixième de $8\pi L_p^2$. Par conséquent, l'aire n'est pas continue, mais granulaire. Il n'existe pas une aire arbitrairement petite. Si l'espace paraît continu, c'est seulement parce que nos yeux ne voient pas la très petite échelle des quanta individuels d'espace. De même que dans un tricot, à une certaine échelle, l'étoffe se révèle tissée de fils individuels.

Quand nous disons que le volume de cette pièce est, par exemple, de 100 m^3 , en fait nous *comptons* les grains d'espace – ou, mieux, les

« quanta de champ gravitationnel » – qu'elle contient. Dans une pièce normale, il y en a un nombre comprenant plus de cent chiffres. Quand nous disons que l'aire de cette page est de 200 cm^2 , nous comptons le nombre de liens du réseau, c'est-à-dire de boucles, qui traversent la page. Cette dernière en compte un nombre constitué d'environ soixante-dix chiffres.

L'idée que la mesure des longueurs, aires et volumes soit en dernière analyse un comptage d'éléments individuels avait été défendue par Riemann au xix^{e} siècle : le mathématicien qui avait développé la théorie des espaces mathématiques courbes *continus* se rendait compte qu'un espace *physique* discret est, en dernière analyse, bien plus rationnel qu'un espace continu.

Essayons de résumer. La gravité quantique à boucles, ou théorie des boucles, combine la relativité générale et la mécanique quantique avec beaucoup de précaution, car elle n'utilise aucune autre hypothèse sinon ces deux théories-là, opportunément réécrites pour être plus compatibles. Mais ses conséquences sont radicales.

La relativité générale nous a enseigné que l'espace n'est pas une boîte rigide et inerte, mais quelque chose de dynamique, comme le champ électromagnétique : un immense mollusque mobile dans lequel nous sommes immergés, qui se comprime et se tord. La mécanique quantique nous enseigne que chaque champ de cette sorte est fait de quanta, c'est-à-dire qu'il a une structure fine granulaire. Qu'est-ce qui découle de ces deux découvertes générales sur la nature ?

Il en découle immédiatement que l'espace physique, étant un champ, est lui aussi fait de quanta. La même structure granulaire qui caractérise les autres champs quantiques caractérise aussi le champ gravitationnel quantique, et doit donc caractériser l'espace. Nous nous attendons donc à ce qu'il existe des quanta d'espace, comme il existe des quanta de lumière, qui sont les quanta du champ

électromagnétique dont est faite la lumière, et comme toutes les particules sont des quanta de champs quantiques. L'espace est le champ gravitationnel et les quanta du champ gravitationnel seront des quanta d'espace : les constituants granulaires de l'espace.

La prédiction centrale de la théorie des boucles est précisément que l'espace n'est pas un continuum, qu'il n'est pas divisible à l'infini, mais qu'il est formé d'« atomes d'espace », très petits : un milliard de milliard de fois plus petits que le plus petit des noyaux atomiques.

Avec la théorie des boucles, l'idée de cette structure atomique et granulaire de l'espace trouve une formulation et une mathématique précises, en mesure d'en décrire la structure quantique et d'en calculer les dimensions précises et la structure générale. La théorie des boucles décrit sous forme mathématique ces « atomes élémentaires d'espace » et les équations qui déterminent leur évolution : les équations générales de la mécanique quantique écrites par Dirac, appliquées au champ gravitationnel d'Einstein.

En particulier, le volume (par exemple le volume d'un petit cube) ne peut pas être arbitrairement petit. Il existe un petit volume minimal. Il n'existe pas d'espace plus petit que ce petit volume minimal. Il existe un « quantum » minimal de volume, un atome élémentaire d'espace.

Atomes d'espace

Vous vous rappelez Achille poursuivant la tortue ? Zénon avait observé qu'il y a quelque chose de difficile à accepter dans l'idée qu'Achille doive parcourir un nombre infini de trajets avant de rattraper le lent animal. Les mathématiques avaient trouvé une réponse possible à cette source de perplexité, en montrant comment un nombre

infini d'intervalles de plus en plus petits peuvent toutefois constituer un intervalle total fini.

Mais est-ce bien ce qui se passe dans la nature ? Existe-t-il vraiment des intervalles, entre Achille et la tortue, arbitrairement courts ? Y a-t-il un sens à parler d'un milliardième de milliardième de milliardième de milliardième de millimètre, et à espérer le diviser encore en d'innombrables intervalles ?

Le calcul des spectres quantiques des quantités géométriques indique que la réponse à cette question est négative : il n'existe pas des morceaux d'espace arbitrairement petits. Il existe une limite inférieure à la divisibilité de l'espace. C'est une très petite échelle, mais elle existe. C'est ce qu'avait pensé Matveï Bronstein, dans les années 1930, en se fondant sur des arguments approximatifs. Le calcul des spectres d'aire et de volume, achevé il y a quelques années, fondé seulement sur l'application des équations de Dirac aux variables de la relativité générale, confirme l'idée et l'inscrit dans une formulation mathématique.

L'espace est donc granulaire. Achille ne peut pas effectuer un nombre infini de sauts pour rattraper la tortue, car il n'existe pas de sauts infiniment petits dans un espace fait de grains de taille finie. Le héros se rapprochera de l'animal et à la fin il ne pourra que le rattraper en un seul bond.

Cher lecteur, réfléchissons bien : n'était-ce pas précisément la solution que proposaient Leucippe et Démocrite ? Il est vrai qu'ils parlaient de structure granulaire de la matière, et sur la structure de l'espace nous ne savons pas bien ce qu'ils disaient. Malheureusement, une fois de plus, nous ne disposons pas de leurs ouvrages et nous devons nous résigner au contenu vague des citations des autres. C'est comme essayer de reconstituer *La Divine Comédie* à partir de son résumé dans les manuels scolaires². Mais, à bien y réfléchir, l'argument

de Démocrite sur l'incohérence de l'idée du continu comme un ensemble de points, rapporté par Aristote, s'applique même mieux à l'espace qu'à la matière. Je n'en suis pas sûr, mais j'imagine que si nous pouvions demander à Démocrite s'il y aurait un sens à pouvoir mesurer l'espace à des échelles arbitrairement petites, ou à le penser comme un vrai continuum de points infinitésimaux, sa réponse ne pourrait que consister à nous rappeler qu'il doit exister une limite à la divisibilité. Pour le grand philosophe d'Abdère, la matière ne pouvait être faite que d'atomes élémentaires indivisibles. Après avoir compris que l'espace peut être regardé comme la matière – que l'espace, comme il le disait, a sa propre nature, une « certaine physique » –, je pense qu'il n'aurait pas hésité à en déduire que l'espace aussi peut être fait seulement d'atomes élémentaires indivisibles. Nous sommes en tout cas sur les traces de Démocrite.

Je ne veux certainement pas dire que la physique après deux millénaires est inutile, que les expériences et les mathématiques ne servent à rien, et que Démocrite pouvait offrir la crédibilité que nous offre la science moderne. Évidemment pas. Sans expériences et sans mathématiques, nous n'aurions jamais compris ce que nous avons compris depuis. Mais développons nos schèmes conceptuels pour comprendre le monde en explorant des idées nouvelles tout en exploitant les intuitions profondes et puissantes qu'ont eues des géants du passé. Démocrite est un de ces géants, et ce que nous trouvons de nouveau, nous le construisons assis sur ses épaules de géant.

Mais revenons-en à la gravité quantique.

Réseaux de spins

Les graphes qui décrivent les états quantiques de l'espace sont caractérisés par un volume v pour chaque nœud et un nombre semi-entier j pour chaque lien. Un graphe avec ces nombres associés s'appelle « réseau de spins » (figure 6.4). Les nombres semi-entiers en physique s'appellent des « spins », car ils apparaissent très souvent dans la mécanique quantique comme des choses qui « tournent » (*to spin*, en anglais). Un réseau de spins représente un possible état quantique de l'espace. Un espace granulaire, où volume et aire sont discrets.

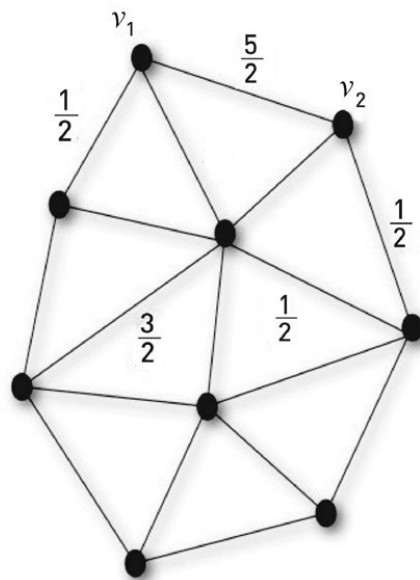


Figure 6.4. Un réseau de spins.

Des quadrillages finis sont souvent utilisés en physique pour approcher l'espace. Mais ici, il n'y a pas d'espace continu à approcher : l'espace est naturellement granulaire à petite échelle. C'est là le cœur de la gravité quantique.

Il y a une différence cruciale entre les photons, quanta du champ électromagnétique, et les nœuds du graphe, ou quanta d'espace. Les photons vivent dans l'espace, tandis que les quanta d'espace sont eux-mêmes l'espace. Les photons sont caractérisés par le lieu « où ils se tiennent³ ». En revanche, les quanta d'espace n'ont pas de lieu où se tenir, car ils sont eux-mêmes « le lieu ». Une autre information cruciale les caractérise : l'information sur les autres quanta d'espace adjacents : qui est voisin de qui. Cette information est exprimée par les liens du graphe. Deux nœuds reliés par un lien sont deux quanta d'espace voisins. Ce sont deux grains d'espace qui se touchent. Et c'est ce « contact » qui construit la structure de l'espace.

Ces quanta de gravité représentés par des nœuds et des liens, je le répète, ne sont pas *dans* l'espace, ils *sont eux-mêmes* l'espace. Les réseaux de spins qui décrivent la structure quantique du champ gravitationnel ne sont pas immergés dans l'espace, ils n'occupent pas un espace. La localisation des quanta d'espace n'est pas définie par rapport à quelque chose, mais seulement par les liens, et seulement en relation les uns avec les autres.

Je peux penser me déplacer d'un grain d'espace à un grain adjacent le long d'un lien. Si je passe de grain en grain jusqu'à clore un circuit et que je reviens au grain de départ, j'ai décrit une « boucle ». Ce sont les boucles originelles de la théorie. Au chapitre 4, j'ai montré que la courbure de l'espace peut être mesurée en déterminant si une flèche transportée par un circuit fermé revient à sa position initiale ou non. Les mathématiques de la théorie déterminent cette courbure pour chaque circuit fermé sur le graphe, ce qui permet d'évaluer la courbure de l'espace-temps, et ainsi la force du champ gravitationnel⁴.

À présent, cependant, rappelons que la mécanique quantique est plus que la seule granularité de quelques grandeurs physiques. Notons aussi les deux autres aspects qui la caractérisent. Tout d'abord, le fait

que l'évolution n'est que probabiliste : la façon dont les réseaux de spins « évoluent » est fortuite, et nous pouvons en calculer la probabilité. Nous parlerons de cela au chapitre suivant, consacré au temps.

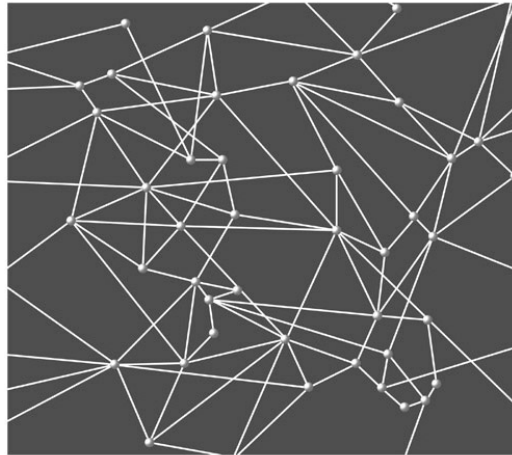


Figure 6.5. À très petite échelle, l'espace n'est pas continu : il est tissé d'éléments finis interconnectés.

Et puis il y a l'autre nouveauté de la mécanique quantique : nous ne devons pas penser aux choses « comme elles sont », mais à la manière dont elles interagissent. Cela signifie que nous ne devons pas regarder les réseaux de spins comme des entités, comme s'il s'agissait d'une grille sur laquelle le monde est posé, mais comme un effet de l'espace sur les choses. Entre une interaction et une autre, de même qu'un électron n'est dans aucun lieu, ou est diffus dans un nuage de probabilités dans tous les lieux, de même l'espace n'est pas un réseau de spins spécifique, mais un nuage de probabilités sur tous les réseaux de spins possibles.

À très petite échelle, l'espace est un pullulement fluctuant de quanta de gravité qui agissent entre eux, et tous ensemble sur les choses, et ils se manifestent dans ces interactions comme des réseaux de spins, des grains en relation les uns avec les autres (figure 6.5).

L'espace physique est le tissu résultant du pullulement continu de cette trame de relations. Les liens eux-mêmes ne sont nulle part, ils ne sont dans aucun lieu : ce sont eux qui, par leurs interactions, créent les lieux. L'espace est créé par l'interaction de quanta individuels de gravité.

Nous voici parvenus à l'un des résultats centraux de la gravité quantique : la structure discrète de l'espace formé par les quanta d'espace⁵. Ce n'est que le premier pas. Le deuxième concerne le temps. C'est à lui qu'est consacré le chapitre suivant.

-
1. Donc les états quantiques de la gravité sont indiqués par $|i_l, \nu_n\rangle$, où n désigne les nœuds et l les lignes du graphe.
 2. Imaginez quel fatras d'absurdités nous paraîtraient les idées d'Aristote et de Platon si nous ne disposions que des commentaires écrits par d'autres et si nous ne pouvions pas saisir la clarté et la complexité des textes originaux !
 3. Le nombre quantique des états des photons dans l'espace de Fock est l'impulsion, la transformée de Fourier de la position.
 4. L'opérateur conjugué à la géométrie de l'espace granulaire est l'holonomie de la connexion gravitationnelle, ou encore, en termes physiques, une « boucle de Wilson » pour la relativité générale.
 5. Le scientifique qui a développé le plus à fond la compréhension de la géométrie quantique est italien et travaille à Marseille : Simone Speziale.

CHAPITRE 7

Le temps n'existe pas

*« Nec per se quemquam tempus sentire fatemur semotum
ab rerum motu... »*

LUCRÈCE, *De rerum natura*¹.

Le lecteur avisé se sera rendu compte qu'au chapitre précédent je n'ai jamais parlé de temps. Et pourtant, Einstein avait montré, il y a plus d'un siècle, que nous ne pouvons pas séparer le temps et l'espace, mais que nous devons les penser ensemble, comme un tout unique, l'espace-temps. C'est le moment d'y remédier et de ramener le temps dans le sujet.

La recherche en gravité quantique a tourné pendant des années autour des seules questions spatiales, avant d'avoir le courage d'affronter le temps. Ces quinze dernières années, la façon de penser le temps a commencé à s'éclairer. Je vais essayer de montrer de quelle manière.

L'espace comme contenant amorphe des choses disparaît de la physique avec la gravité quantique. Les choses (les quanta) ne résident

pas dans l'espace, elles résident les unes dans les parages des autres, et l'espace est le tissu de leurs relations de voisinage.

Si nous devons abandonner l'idée de l'espace comme contenant inerte, alors il faut aussi abandonner l'idée de temps comme flux inerte au long duquel se déroule la réalité. De même que disparaît l'idée d'un espace continu qui contient les choses, disparaît aussi l'idée d'un temps continu qui s'écoule, et au cours duquel se produisent les phénomènes.

En un certain sens, l'espace n'existe plus dans la théorie fondamentale : les quanta du champ gravitationnel ne sont pas *dans* l'espace. De la même façon, le temps dans la théorie fondamentale n'existe plus : les quanta de gravité n'évoluent pas *dans* le temps. C'est le temps qui naît comme conséquence de leurs interactions. Comme cela était apparu avec l'équation de Wheeler-DeWitt, les équations ne contiennent plus la variable temps. Le temps doit émerger, comme l'espace, du champ gravitationnel quantique.

Cela est déjà vrai pour la relativité générale, où le temps apparaît comme un aspect du champ gravitationnel. Mais tant que nous négligeons les quanta, nous pouvons encore penser l'espace-temps de façon assez conventionnelle, comme la tapisserie sur laquelle se déploie l'histoire du reste de la réalité, même s'il s'agit d'une tapisserie courbe. Dès que nous tenons compte de la mécanique quantique, en revanche, nous devons reconnaître combien le temps lui aussi doit avoir ces aspects d'indétermination probabiliste, de granularité et de relation, communs à toute la réalité. Il devient un temps très différent de tout ce que nous avons appelé jusque-là « temps ».

Cette deuxième conséquence conceptuelle de la théorie de la gravité quantique est plus extrême que la disparition de l'espace. Essayons de la comprendre.

Le temps n'est pas ce que nous croyons

Que le temps de la nature soit différent de l'idée commune que nous en avons était déjà clair depuis plus d'un siècle. La relativité restreinte et la relativité générale n'avaient fait que renforcer cette observation. Aujourd'hui, l'inadéquation de nos préjugés sur le temps est facile à vérifier dans un laboratoire.

Reconsidérons, par exemple, la première conséquence de la relativité générale illustrée au chapitre 3 : prenez deux montres, assurez-vous qu'elles marquent la même heure, placez-en une par terre et l'autre sur un meuble. Attendez une petite demi-heure et remettez-les l'une à côté de l'autre. Marqueront-elles encore la même heure ?

Si vous vous rappelez ce que je disais au chapitre 3, la réponse est non. Les montres que d'habitude nous avons au poignet ou dans notre téléphone portable ne sont pas assez précises pour nous permettre de vérifier ce fait, mais dans de nombreux laboratoires de physique il existe des horloges suffisamment précises pour montrer ce décalage : l'horloge laissée par terre retardera par rapport à celle posée sur le meuble.

Pourquoi ? Parce que le temps ne passe pas de façon égale dans le monde. Dans certains lieux, il s'écoule plus vite, plus lentement dans d'autres. Plus près de la Terre, là où la gravité² est plus forte, le temps ralentit. Vous vous souvenez des deux jumeaux du chapitre 3, qui se retrouvent avec des âges différents après avoir vécu des années l'un à la mer et l'autre à la montagne ? Évidemment, l'effet est extrêmement ténu : le temps gagné sur une vie à la mer par rapport à celle vécue sur la plus haute montagne se compte en fractions de seconde infinitésimales, mais il y a bien une différence réelle. Le temps ne fonctionne pas comme nous le pensons habituellement.

Nous ne pouvons pas penser le temps comme s'il s'agissait d'une grande horloge cosmique qui scande la vie de l'Univers. Nous avons appris depuis plus d'un siècle à concevoir le temps comme un élément local : chaque objet de l'Univers a son propre temps qui s'écoule, et ce qui détermine ce temps, c'est le champ gravitationnel.

Mais ce temps local ne fonctionne même plus quand nous prenons en considération la nature quantique du champ gravitationnel. Les faits quantiques ne sont plus ordonnés par un écoulement du temps, sur une très petite échelle.

Mais que signifie que le temps n'existe pas ?

Avant tout, l'absence de la variable temps dans les équations fondamentales ne signifie pas que tout est immuable et qu'il n'existe aucun changement. Au contraire, cela signifie que le changement est partout. Mais les processus élémentaires ne peuvent pas être ordonnés en une succession commune d'instants. À la très petite échelle des quanta d'espace, la danse de la nature ne se déroule pas au rythme de la baguette d'un seul chef d'orchestre qui bat une mesure universelle : chaque processus danse indépendamment de ses voisins, en suivant un rythme propre. L'écoulement du temps est interne au monde, il naît dans le monde même, à partir des relations entre des événements quantiques qui sont le monde et qui déterminent eux-mêmes leur temps propre. En réalité, l'inexistence du temps ne signifie rien de bien compliqué. Essayons de le comprendre.

Le pouls et le luminaire

Presque toutes les équations de la physique classique comportent la variable temps. Traditionnellement, elle est indiquée par la lettre t . Les équations nous disent combien les choses changent avec le temps et

nous permettent de prédire ce qui va se produire dans un temps futur, si nous savons ce qui s'est produit dans un temps passé. Plus précisément, nous mesurons des variables – par exemple, la position A d'un objet, l'amplitude B d'un pendule qui oscille, la température C d'un corps, etc. – et les équations de la physique nous disent comment ces variables A , B , C changent avec le temps. Autrement dit, elles prédisent les fonctions $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, et ainsi de suite, qui décrivent le changement de ces variables dans le temps t à partir des conditions initiales.

C'est Galilée qui a compris le premier que le mouvement des objets sur Terre pouvait être décrit par des équations pour les fonctions du temps $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, et qui a écrit les toutes premières équations pour ces fonctions. La première loi physique terrestre trouvée par Galilée, par exemple, décrit comment un objet tombe, c'est-à-dire comment sa hauteur au-dessus du sol x varie au cours du temps t ($x(t) = \frac{1}{2}at^2$).

Pour découvrir puis vérifier cette loi, Galilée avait besoin de deux mesures. Il lui fallait mesurer la hauteur x de l'objet et le temps t . Il avait donc besoin d'un instrument de mesure du temps – d'une *horloge*.

À l'époque, il n'existait pas d'horloges précises, mais Galilée lui-même avait trouvé le moyen de construire des horloges précises. Il avait découvert que les oscillations d'un pendule ont toutes la même durée (même si l'amplitude diminue). On pouvait donc mesurer le temps en comptant les oscillations d'un pendule. Cela semblait évident, mais il a fallu Galilée pour le découvrir ; personne n'y avait pensé avant lui : la science est ainsi faite.

Mais les choses ne sont pas aussi simples.

Selon la légende, Galilée a eu cette intuition dans la splendide cathédrale de Pise, en observant les lentes oscillations d'un gigantesque luminaire, encore suspendu là aujourd'hui. (L'histoire est fausse, car le luminaire n'y a été suspendu que des années après la découverte de

Galilée, mais c'est une belle histoire. Ou alors, il y avait auparavant un autre luminaire, je n'en sais rien...) Le scientifique observait les oscillations lors d'un office religieux – qui, à l'évidence, ne l'intéressait pas beaucoup – et mesurait les battements de son pouls. Ému, il découvrit que le nombre de battements était le même pour chaque oscillation, et que ce nombre ne changeait même pas quand le candélabre ralentissait et oscillait avec une moindre amplitude. Il en a déduit que les oscillations avaient toutes la même durée.

L'histoire est belle, mais si l'on y réfléchit plus attentivement, elle laisse perplexe, et cette perplexité constitue le cœur du problème du temps. La perplexité est la suivante : comment Galilée pouvait-il savoir que *ses propres battements* avaient tous la même durée³ ?

Quelques années seulement après Galilée, les médecins ont commencé à mesurer les battements du pouls de leurs patients en utilisant une montre, qui n'est pas autre chose qu'un pendule. Alors, nous utilisons les battements pour nous assurer que les battements sont réguliers. N'est-ce pas un cercle vicieux ? Qu'est-ce que cela signifie ?

Cela signifie qu'en réalité nous ne mesurons jamais le temps en soi, mais toujours des variables physiques A , B , C ... (des oscillations, des battements et bien d'autres choses encore) et que nous confrontons toujours une variable à une autre, c'est-à-dire que nous mesurons les fonctions $A(B)$, $B(C)$, $C(A)$... et ainsi de suite. Nous pouvons compter le nombre de battements pour chaque oscillation, le nombre d'oscillations pour chaque clic de mon chronomètre, le nombre de clics de mon chronomètre par rapport à l'horloge du clocher... Il est *utile* d'imaginer qu'il existe la variable t , le « vrai temps », qui se soumet à tout, même si nous ne pouvons pas le mesurer directement. Nous écrivons toutes les équations pour les variables physiques par rapport à ce t inobservable, des équations qui nous disent combien les choses changent en t , c'est-à-dire, par exemple, combien de temps prend

chaque oscillation, combien chaque battement cardiaque. À partir de là, nous pouvons calculer de combien les variables changent l'une par rapport à l'autre, par exemple combien de battements comprend une oscillation, et confronter cette prévision avec ce que nous observons dans le monde. Si les prévisions sont justes, nous en déduisons que tout ce schéma compliqué est bon, et en particulier qu'il est utile d'user de la variable temps t , même si nous ne pouvons pas la mesurer directement.

En d'autres termes, l'existence de la variable temps est une hypothèse, non le résultat d'une observation.

C'est Newton qui a compris tout cela : il a compris que c'était là ce qu'il fallait faire et il a éclairci et mis au point ce schéma. Newton affirme explicitement que nous ne pouvons pas mesurer le « véritable » temps t , mais que si nous *supposons* qu'il existe, nous pourrions construire un schéma très efficace pour comprendre et décrire la nature.

Cela étant éclairci, venons-en enfin à la gravité quantique et à la signification de l'assertion : « Le temps n'existe pas. » Cela signifie simplement que le schéma newtonien ne fonctionne plus quand nous nous occupons de choses très petites. C'était un bon schéma, mais seulement pour les grands phénomènes.

Si nous voulons comprendre le monde plus généralement, si nous voulons le comprendre aussi sous des aspects moins familiers, nous devons renoncer à ce schéma. L'idée d'un temps t qui s'écoule en soi, et par rapport à quoi tout le reste évolue, n'est plus une idée efficace. Le monde n'est pas décrit par des équations d'évolution dans le temps t .

Ce que nous devons faire, c'est simplement nous limiter à lister les variables A , B , C ... que nous observons *effectivement*, et écrire des relations entre ces variables, c'est-à-dire des équations pour les

relations $A(B)$, $B(C)$, $C(A)$... que nous observons, et non pour les fonctions $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$... que nous *n'observons pas*.

Dans l'exemple du pouls et du luminaire, nous n'aurons pas le pouls et le luminaire évoluant dans le temps, mais seulement des équations qui nous disent comment l'un et l'autre peuvent évoluer l'un par rapport à l'autre. Autrement dit, des équations qui, au lieu de parler du temps t d'un battement du pouls et du temps t d'une oscillation du luminaire, nous disent directement combien il y a de battements du pouls durant une oscillation du luminaire, sans parler de t .

La « physique sans temps » est la physique où l'on ne parle que du pouls et du luminaire, sans évoquer le temps.

Il s'agit d'un changement simple, mais d'un point de vue conceptuel le saut est grand. Nous devons apprendre à penser le monde non comme quelque chose qui change avec le temps, mais d'une autre manière. Les choses changent seulement en relation les unes par rapport aux autres. En soi, le temps n'existe pas. L'impression du temps qui s'écoule n'est qu'une approximation qui n'a de valeur que pour nos échelles macroscopiques : elle vient du fait que nous n'observons le monde que de manière grossière.

Le monde que décrit la théorie est loin de celui qui nous est familier. Il n'y a plus l'espace qui « contient » le monde ni le temps « au cours duquel » se produisent les faits, mais des processus élémentaires où des quanta d'espace et de matière interagissent sans arrêt. L'illusion de l'espace et du temps continus autour de nous est la vision floue de ce pullulement dense de processus élémentaires. Comme un calme et limpide lac alpin est formé par une danse rapide de myriades de minuscules molécules d'eau.

Sushis d'espace-temps

Comment ces idées s'appliquent-elles à la gravité quantique ? Comment décrire le changement où n'existent ni l'espace contenant le monde, ni le temps au cours duquel ce monde évolue ?

La solution consiste à se demander comment se situent dans l'espace et dans le temps les processus physiques normaux. Pensez à un processus quelconque, par exemple le choc de deux boules de billard sur la table. Imaginez une boule noire lancée vers une blanche, elle s'approche, elle la heurte et les deux boules s'éloignent dans des directions opposées. Ce processus, comme tous les processus, advient dans une zone finie de l'espace, disons une table d'environ 2 mètres de côté, et il dure un intervalle de temps fini, disons trois secondes. Pour traiter ce processus selon la gravité quantique, il faut inclure l'espace et le temps eux-mêmes dans le processus ([figure 7.1](#)).

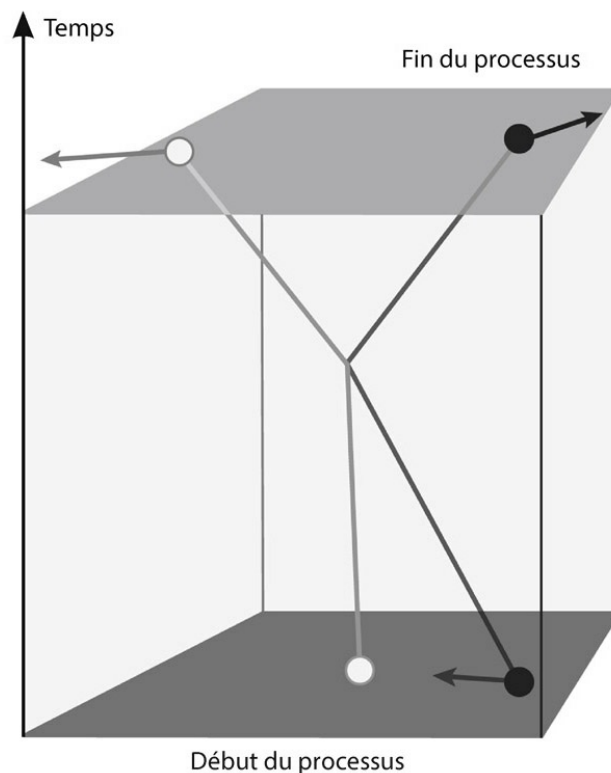


Figure 7.1. Une région d'espace-temps dans laquelle une boule noire vient heurter une boule blanche immobile, rebondit et la met en mouvement. La boîte est la région d'espace-temps. À l'intérieur sont dessinés les parcours des deux boules.

Nous ne devons donc pas décrire seulement les deux boules, mais aussi tout ce qui les entoure : la table, les autres objets matériels éventuels et surtout l'espace dans lequel elles s'inscrivent, pendant tout le temps passé entre le début du lancement et la fin du processus. Rappelons qu'espace et temps sont un champ gravitationnel, le mollusque d'Einstein, pour lequel nous incluons aussi dans le processus le champ gravitationnel. Tout est intégré dans le grand mollusque d'Einstein : imaginez que vous en découpez une petite portion finie, comme un morceau de sushi, qui comprenne le choc et ce qu'il y a autour.

Ce que nous obtenons, c'est une boîte d'espace-temps, comme à la [figure 7.1](#) : un morceau fini d'espace-temps de quelques mètres cubes de volume durant quelques secondes de temps. Observez comment ce processus ne se produit pas dans le temps. La boîte n'est pas *dans* l'espace-temps, elle *inclut* l'espace-temps. Notez que ce processus ne se produit pas *dans* le temps, de même que les grains d'espace ne sont pas *dans* l'espace. Le processus est en soi le déroulement du temps, de même que les quanta de gravité ne sont pas *dans* l'espace, étant eux-mêmes l'espace.

Pour comprendre comment fonctionne la gravité quantique, il faut considérer non seulement le processus physique donné par les deux boules, mais le processus entier défini par toute la boîte avec tout ce qu'elle contient, y compris le champ gravitationnel.

À présent, revenons à l'intuition originelle de Heisenberg : la mécanique quantique ne nous dit pas ce qui se passe au cours d'un processus, mais la probabilité qui lie les différents états initiaux et

finaux possibles du processus. Ces états initiaux et finaux en ce cas sont donnés par tout ce qui se produit au *bord* de la boîte d'espace-temps.

Eh bien, ce que les équations de la gravité quantique à boucles nous donne, c'est la probabilité associée à tout possible *bord* de la boîte. C'est-à-dire, par exemple, la probabilité que les deux boules sortent de la collision de telle ou telle façon, selon qu'elles y sont entrées de telle ou telle façon.

Comment calculer cette probabilité ? Vous vous rappelez la « somme sur les chemins » de Feynman que j'ai décrite en parlant de mécanique quantique ? Les probabilités, en gravité quantique, peuvent être calculées de la même manière. À savoir, en considérant tous les parcours possibles qui ont le même bord. Comme nous considérons ici la dynamique de l'espace-temps, nous devons considérer *tous les espaces-temps possibles* qui ont le même bord de la boîte.

La mécanique quantique implique qu'entre le bord initial, où entrent les deux balles, et le bord final, où elles sortent, il n'y a pas un espace-temps précis ou un parcours défini des boules. Il y aura en revanche un « nuage » quantique, dans lequel existent à la fois tous les espaces-temps possibles et tous les chemins possibles. Et la probabilité de voir sortir les boules de telle ou telle façon sera calculée en faisant la somme de tous les espaces-temps possibles⁴.

Mousses de spins

Si l'espace quantique a la structure d'un réseau, quelle structure un *espace-temps* quantique aura-t-il ? Comment sera un des espaces-temps qui entrent dans le calcul évoqué ci-dessus ? Ce sera une « histoire », c'est-à-dire un chemin, d'un réseau. Imaginez que vous prenez un réseau et que vous le déplacez : chaque sommet du réseau dessinera

une ligne, comme les boules de la [figure 7.1](#), et chaque ligne du réseau, en se déplaçant, dessinera une surface : par exemple, un segment qui se déplace dessine un rectangle. Mais il y a plus : un sommet peut s'ouvrir en deux ou plusieurs sommets, de même qu'une particule peut se décomposer en deux ou plusieurs particules. Ou alors, deux ou plusieurs sommets peuvent se recombinaisonner en un seul. Ainsi, un réseau qui évolue dessine une image comme à la [figure 7.2](#).

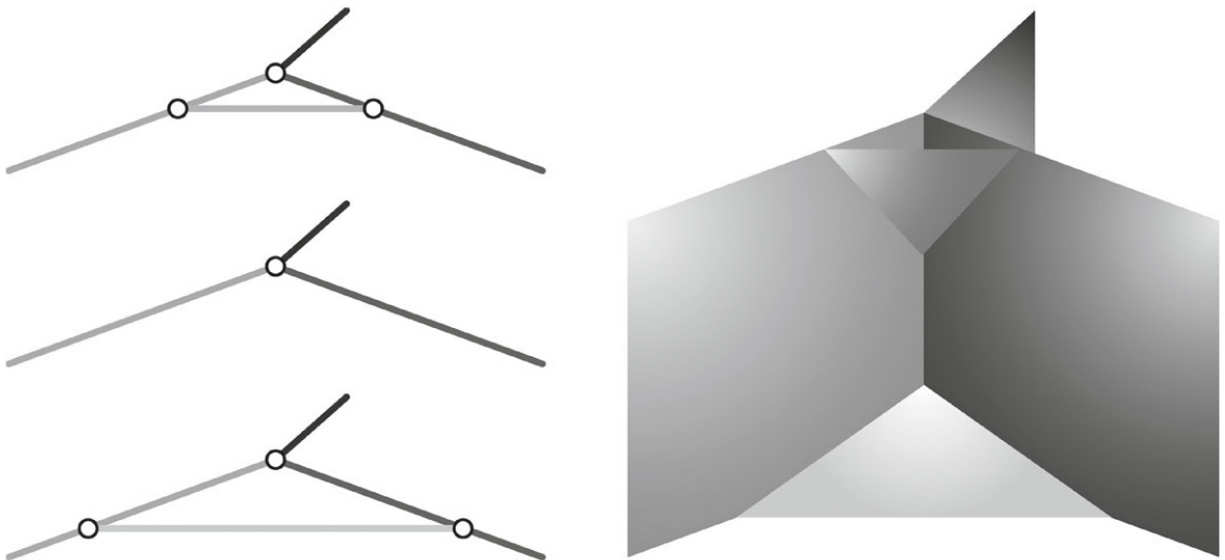


Figure 7.2. Un réseau de spins qui évolue : trois sommets se combinent en un seul, avant de se séparer de nouveau. À droite, la mousse de spins que ce processus dessine.

L'image représentée à droite dans la [figure 7.2](#) est appelée « mousse de spins ». Mousse parce que, si vous regardez bien, elle est faite de surfaces qui se coupent selon des lignes, lesquelles se recoupent aux sommets, et c'est exactement la structure de la mousse de savon ([figure 7.3](#)), où les bulles se rencontrent elles aussi sur des lignes qui s'unissent aux sommets. On l'appelle mousse de spins car les lignes des

réseaux de spins sont « labellisées » avec des spins, et donc les faces de cette mousse sont elles aussi labellisées par des spins, c'est-à-dire des nombres semi-entiers.



Figure 7.3. Mousse de bulles de savon.

Pour calculer les probabilités d'un processus, il faut additionner toutes les mousses de spins possibles qui sont dans la boîte, c'est-à-dire qui ont le même bord, où le bord représente le réseau de spins et la matière qui entre et sort du processus.

Les équations de la gravité quantique à boucles expriment ces probabilités en termes de sommes sur les mousses de spins à bord déterminé. De la sorte, on peut calculer, en principe, les probabilités de tous les événements. (La structure des sommes de cette mousse, pour être précis, est un peu plus complexe que celle de la [figure 7.2](#) et ressemble plus à celle de la [figure 7.4](#).)

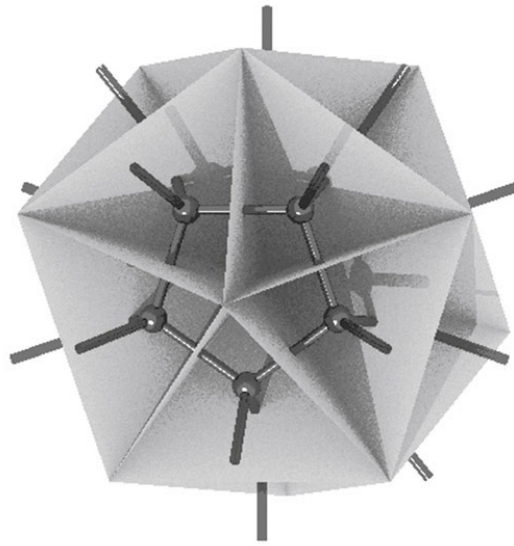


Figure 7.4. La forme d'un sommet d'une mousse de spins. Avec l'aimable autorisation de Greg Egan.

Les théories quantiques de champ qui constituent le modèle standard des particules élémentaires, et qui jusqu'à présent en ont donné une excellente preuve, sont de deux genres. On a un exemple du premier genre avec l'électrodynamique quantique, ou QED (*quantum electro-dynamics*), construite par Feynman, une composante du modèle standard. Dans cette théorie, pour faire des comptes, on calcule des nombres associés aux « graphiques de Feynman » qui représentent les processus élémentaires entre les particules. Un exemple de graphique de Feynman est proposé à la [figure 7.5](#). Cette figure représente deux particules, c'est-à-dire deux quanta du champ qui interagissent entre eux. Au début, la particule de gauche se dégrade en deux particules, dont l'une, à son tour, se divise en deux particules qui ensuite se réunissent et vont confluer dans la particule de droite, et ainsi de suite. Le graphique représente donc une *histoire* de quanta du champ.

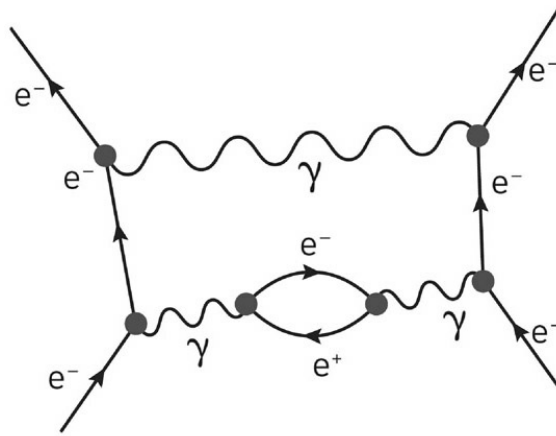


Figure 7.5. Graphique de Feynman.

Un deuxième genre de théorie quantique de champ qui fonctionne bien est illustré par la chromodynamique quantique, ou QCD (*quantum chromo-dynamics*), une autre composante du modèle standard qui décrit, par exemple, les forces entre les quarks à l'intérieur des protons. En QCD, souvent, on n'arrive pas à appliquer la technique des diagrammes de Feynman. Mais il existe une autre technique qui fonctionne bien pour calculer un tas de choses : la « théorie du réseau ». Elle consiste à modéliser l'espace physique continu à l'aide d'un réseau, comme à la [figure 7.6](#), sauf que, dans le cas de la gravité quantique, ce réseau n'est pas considéré comme une vraie description de l'espace, mais seulement comme une approximation pour effectuer des calculs, comme lorsque les ingénieurs calculent la solidité d'un pont en le modélisant par un nombre fini d'éléments.

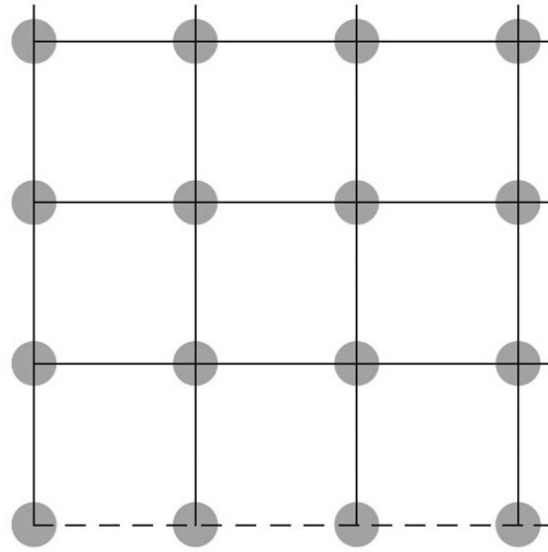


Figure 7.6. Réseau modélisant l'espace-temps physique.

Ces deux techniques de calcul, les diagrammes de Feynman et le réseau, sont les deux outils les plus efficaces de la théorie quantique de champ.

La gravité quantique, en revanche, ménage une heureuse surprise : les deux techniques de calcul s'y confondent. En effet, la mousse d'espace-temps représentée à la [figure 7.2](#), qui sert à calculer les processus physiques en gravité quantique, peut être interprétée *soit* comme un graphique de Feynman, *soit* comme un calcul sur réseau.

C'est un graphique de Feynman, car c'est bien une histoire de quanta, comme dans les graphiques de la QED. Sauf que, à présent, il ne s'agit plus de quanta évoluant dans l'espace, mais de quanta d'espace. Aussi le graphe qu'ils dessinent dans leurs interactions n'est-il pas une représentation du mouvement de particules dans l'espace, mais une représentation de la trame de l'espace même. Et cette trame est bien aussi un réseau comme celui qu'on utilise pour les calculs en QCD, à cette différence près qu'il ne s'agit pas d'une approximation, mais de

la structure granulaire *réelle* de l'espace à petite échelle. Les techniques de calcul de la QED et de la QCD se révèlent être des cas particuliers d'une technique générale, qui est la somme sur les *mousses de spins* de la gravité quantique.

Comme cela a été le cas pour les équations d'Einstein, je ne peux m'empêcher d'écrire l'ensemble complet des équations qui décrivent la théorie, même si, évidemment, le lecteur ne pourra pas les déchiffrer, à moins qu'il veuille se mettre à étudier pas mal de mathématiques et d'ouvrages techniques. On a pu dire qu'une théorie n'est pas crédible si ses équations ne peuvent pas tenir sur un T-shirt. Voici ce T-shirt ([figure 7.7](#)).

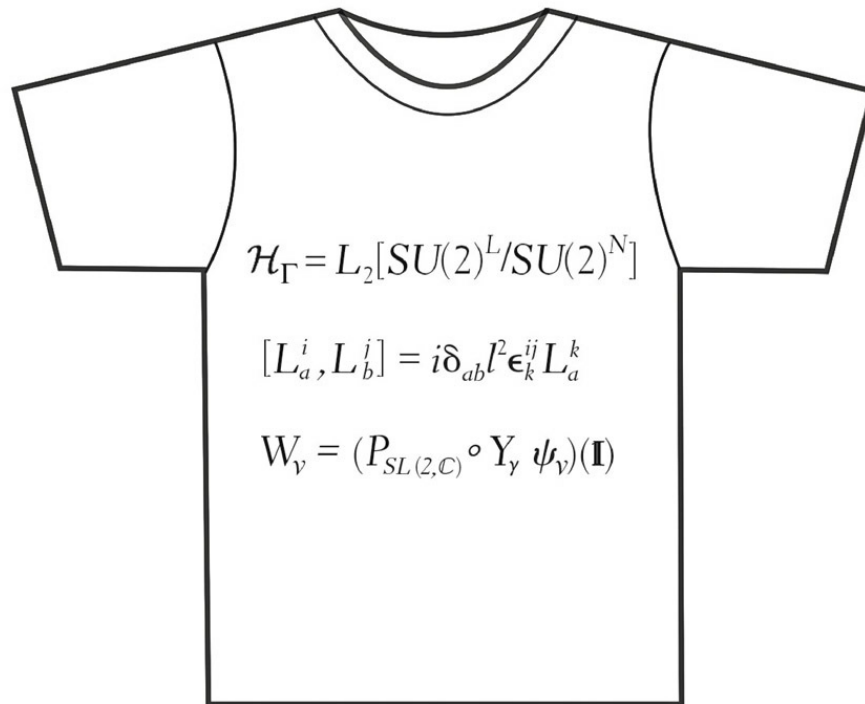


Figure 7.7. Les équations de la gravité quantique à boucles résumées sur un T-shirt.

Ces équations⁵ sont la version mathématique de la description du monde proposée dans les deux derniers chapitres. Bien entendu, nous ne sommes absolument pas sûrs qu'il s'agisse vraiment des bonnes équations ; elles sont sans doute à modifier ou peut-être à réécrire de fond en comble. Mais c'est, me semble-t-il, ce que pour l'instant nous comprenons le mieux.

L'espace est un réseau de spins, dont les nœuds représentent les grains élémentaires et les liens leurs relations de voisinage. L'espace-temps est créé à partir des processus où ces réseaux de spins se transforment les uns en les autres, et ces processus sont exprimés par des sommes de mousses de spins, où une mousse de spins représente un parcours idéal d'un réseau de spins, c'est-à-dire un espace-temps granulaire, où les sommets du réseau se combinent et se séparent.

Ce pullulement microscopique de quanta à l'origine de l'espace et du temps obéit au calme apparent de la réalité macroscopique qui nous entoure. Chaque centimètre cube d'espace et chaque seconde qui passe sont le résultat de cette mousse dansante de quanta minuscules.

De quoi le monde est-il fait ?

L'espace de fond a disparu, le temps a disparu, ainsi que les particules classiques et les champs classiques. De quoi le monde est-il fait ?

La réponse est simple : les particules sont des quanta de champs quantiques ; la lumière est formée des quanta d'un champ ; l'espace n'est qu'un champ, lui aussi quantique ; et le temps naît à partir des processus de ce même champ. Autrement dit, le monde est entièrement fait de champs quantiques ([figure 7.8](#)).

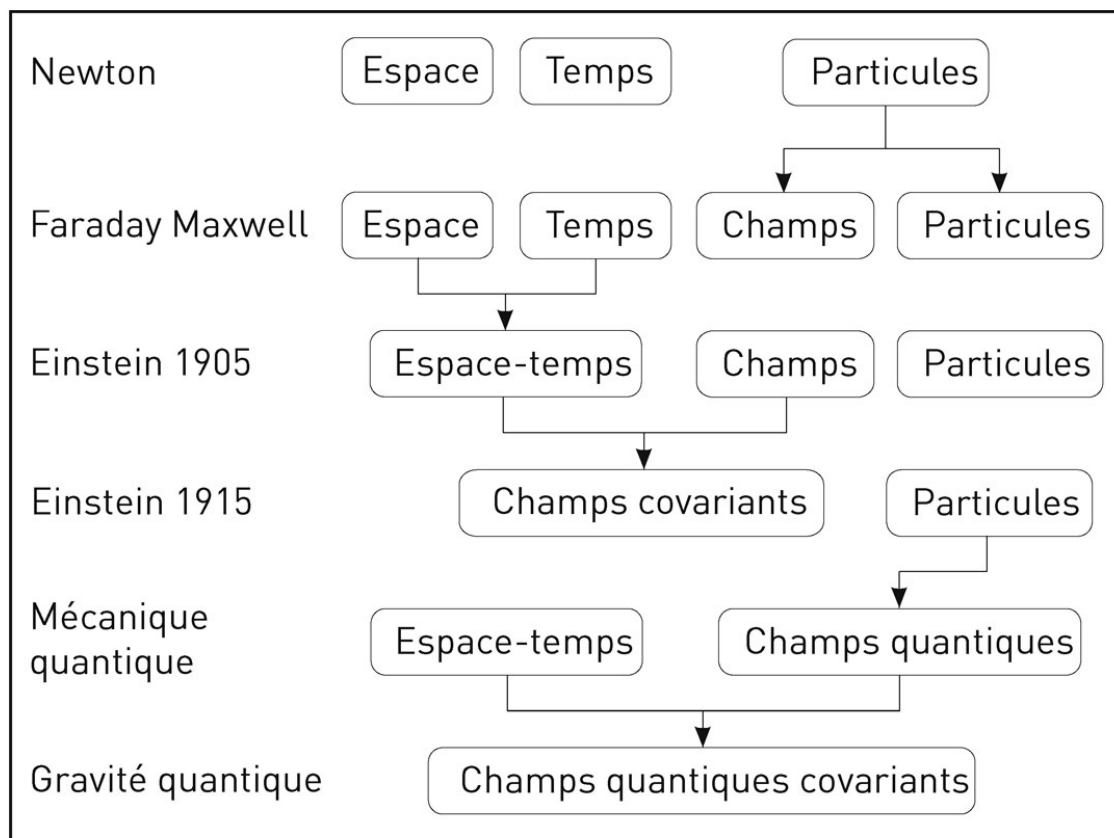


Figure 7.8. De quoi le monde est-il fait ? D'un seul ingrédient : de champs quantiques covariants.

Ces champs ne vivent pas *dans* l'espace-temps ; ils vivent, pour ainsi dire, les uns sur les autres : des champs sur des champs. L'espace et le temps que nous percevons à grande échelle sont l'image floue et approchée d'un de ces champs quantiques : le champ gravitationnel.

Les champs qui vivent sur eux-mêmes, sans besoin d'un espace-temps pour leur servir de substrat, et capables d'engendrer eux-mêmes l'espace-temps, sont appelés champs quantiques *covariants*. La substance dont le monde est fait s'est radicalement simplifiée ces dernières années. Le monde, les particules, l'énergie, l'espace et le

temps ne sont que la manifestation d'un seul genre d'entité : les champs quantiques covariants.

Les champs quantiques covariants représentent la meilleure description que nous ayons aujourd'hui de l'ἄπειρον, l'*apeiron*, la substance primordiale qui forme le tout, conçue par le premier savant et premier philosophe, Anaximandre⁶.

La séparation entre l'espace courbe et continu de la relativité générale d'Einstein et les quanta discrets de la mécanique quantique qui vivent dans un espace plat et uniforme est à présent complètement caduque. L'apparente contradiction n'existe plus. Entre le continuum de l'espace-temps et les quanta d'espace, il n'y a pas autre chose que la même relation existant entre les ondes électromagnétiques et les photons. Les ondes sont une vision approximative à grande échelle des photons. Les photons sont la façon dont les ondes interagissent. L'espace et le temps continus sont une vision approximative à grande échelle de la dynamique des quanta de gravité. Les quanta de gravité sont la façon dont espace et temps interagissent. Les mathématiques elles-mêmes décrivent de manière cohérente le champ gravitationnel quantique, de même que les autres champs quantiques.

Le prix conceptuel à payer, c'est le renoncement à l'idée d'espace et de temps comme structures générales dans lesquelles intégrer le monde. L'espace et le temps sont des approximations qui n'apparaissent qu'à grande échelle. Kant avait sans doute raison quand il disait que le sujet de la connaissance et son objet sont inséparables, mais il avait tort quand il pensait que l'espace et le temps newtoniens pouvaient être des formes *a priori* de la connaissance, des parties d'une grammaire indispensable pour comprendre le monde. Cette grammaire a évolué et évolue sans cesse avec l'accroissement de notre connaissance.

La relativité générale et la mécanique quantique ne sont d'ailleurs pas tant en tension l'une contre l'autre, comme on pouvait le penser initialement. Et même, à bien y regarder, elles se donnent la main et se parlent en profondeur. Les relations spatiales qui tissent l'espace courbe d'Einstein sont les interactions qui tissent les relations entre les systèmes élémentaires de la mécanique quantique. Elles deviennent compatibles et alliées, comme les deux faces d'une même médaille, dès qu'on réalise que l'espace et le temps sont des aspects d'un champ quantique et que les champs quantiques peuvent exister même sans avoir « les pieds posés » dans un espace externe.

Ce tableau restreint de la structure fondamentale du monde physique est le regard sur la réalité qu'offre aujourd'hui la gravité quantique à boucles.

Le principal avantage de cette physique est que, comme nous le verrons dans la partie suivante, l'infini disparaît. L'infiniment petit n'existe plus. Les infinis qui embarrassaient la théorie quantique des champs, définie sur un espace continu, disparaissent : ils provenaient précisément de l'hypothèse, physiquement erronée, de la continuité de l'espace. Les singularités qui rendaient absurdes les équations d'Einstein quand le champ gravitationnel devenait trop fort disparaissent : elles venaient seulement de ce qu'on négligeait la quantification du champ. Peu à peu, les pièces du puzzle se mettent en place. Dans la dernière partie, je décrirai plusieurs conséquences physiques de la théorie.

Il peut sembler bizarre et difficile de penser à ces entités discrètes élémentaires qui ne sont ni dans l'espace ni dans le temps, et qui cependant tissent de l'espace et du temps par leurs relations. Mais ne pouvait-il pas paraître bizarre d'entendre Anaximandre dire que sous nos pieds il n'y avait sans doute que le même ciel que celui que nous voyons au-dessus de nos têtes ? Ou Aristarque, quand il a essayé de

mesurer la distance de la Lune et du Soleil, en découvrant qu'ils sont très éloignés et qu'il ne s'agit donc pas de petites boules, mais d'astres gigantesques, et que le Soleil est immense par rapport à la Terre ? Ou Hubble, quand il a compris que les petits nuages diaphanes au milieu des étoiles sont d'immenses mers d'étoiles immensément lointaines ?

Le monde n'a pas cessé de s'élargir autour de nous pendant des siècles. Nous voyons plus loin, nous le comprenons mieux et demeurons stupéfaits devant sa diversité, toujours plus vaste que ce que nous pouvons imaginer, et devant le caractère limité des images que nous en avons. En même temps, la description que nous parvenons à en donner devient plus restreinte, mais aussi plus simple.

Nous sommes de petites taupes aveugles sous la terre qui savent peu, voire rien, du monde, mais nous continuons à apprendre.

Tout le récit qu'ils nous ont fait de cette nuit [...] est plus convaincant que de fantastiques visions ; – il a le caractère d'une grande consistance, – tout étrange et tout merveilleux qu'il est⁷.

1. « Personne, il faut l'admettre, n'a le sentiment du temps en soi / abstrait du mouvement des choses... » (I, 462-463).

2. Le potentiel gravitationnel.

3. D'autant plus qu'il était ému...

4. Les premiers calculs importants sur les collisions gravitationnelles de particules avec des techniques de mousses de spins ont été complétés par Emmanuele Alesci, qui travaille aujourd'hui en Pologne, Claudio Perini et Elena Magliaro, contraints d'abandonner la recherche théorique à cause du petit nombre de postes de recherche.

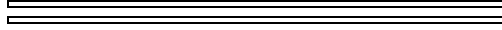
5. La première définit l'espace de Hilbert de la théorie. La deuxième, l'algèbre des opérateurs. La troisième, l'amplitude de transition à chaque sommet comme celui de la [figure 7.4](#).

6. « Toutes les particules élémentaires pourraient se réduire à une substance universelle que nous pouvons appeler énergie ou matière ; mais aucune de ces diverses particules ne pourrait être préférée aux autres comme étant plus fondamentale. Ce dernier point de vue correspond naturellement à la doctrine d'Anaximandre, et je suis convaincu qu'en physique moderne, c'est ce point de vue qui est le bon. » (W. Heisenberg, *Physique et philosophie*, Albin Michel, 2000).

7. W. Shakespeare, *Le Songe d'une nuit d'été*, tr. François-Victor Hugo, V, 1, J'ai lu, « Libro », 2007.

QUATRIÈME PARTIE

AU-DELÀ DE L'ESPACE ET DU TEMPS



Dans la partie précédente, j'ai illustré les bases de la gravité quantique et l'image du monde qui en découle.

Dans ces ultimes chapitres, j'évoquerai quelques-unes des conséquences possibles de la théorie, comme ce qu'elle nous dit sur des phénomènes tels que le Big Bang ou les trous noirs. Je discuterai aussi de l'état actuel des expériences possibles pour tester la théorie et ce que la nature semble nous dire, en particulier avec l'observation manquée des particules supersymétriques à l'énergie où elles étaient attendues.

Enfin, je conclurai par diverses réflexions sur les idées, pour l'instant très vagues, autour de ce que je crois manquer encore à notre compréhension du monde : définir le rôle de la thermodynamique et de l'information d'une théorie sans temps et sans espace comme la gravité quantique, et comprendre l'émergence du temps.

Tout cela nous conduit au bord de ce que nous savons, d'où nous nous penchons vers ce que nous ne savons radicalement pas encore, le beau et immense mystère qui nous entoure.

CHAPITRE 8

Au-delà du Big Bang

Le Maître

En 1927, un jeune scientifique belge formé par les jésuites, qui avait prononcé ses vœux comme prêtre catholique quelques années auparavant, étudie les équations d'Einstein et se rend compte, comme Einstein un peu plus tôt, de leur capacité à prédire que l'Univers est en train de s'étendre ou de se contracter. Toutefois, au lieu de rejeter d'emblée ce résultat, comme l'avait fait Einstein, et de tenter orgueilleusement de l'escamoter, le prêtre belge le prend au sérieux et se fait envoyer les premières données disponibles sur l'observation des galaxies.

Elles ne s'appelaient pas encore galaxies, mais « nébuleuses », car elles apparaissaient au télescope comme de petits nuages opalescents entre les étoiles, et on ne savait pas encore bien qu'il s'agissait d'immenses îles d'étoiles comme notre propre Galaxie. Mais le jeune prêtre belge comprend que ces données sont compatibles avec l'idée d'un Univers en expansion : les galaxies proches s'éloignent à grande vitesse, comme si elles avaient été projetées dans le ciel. Les galaxies

plus lointaines s'éloignent à une vitesse encore plus grande. L'Univers entier se dilate comme une baudruche.

Cette intuition est confirmée deux ans plus tard par deux astronomes américains, Henrietta Leavitt ([figure 8.1](#)) et Edwin Hubble. La première découvre une technique pour mesurer la distance des nébuleuses, qui permet de confirmer combien elles sont effectivement éloignées, en dehors de notre Galaxie. Le second, en utilisant la même technique et le grand télescope de l'observatoire du mont Palomar, obtient des données précises qui confirment le fait que les galaxies s'éloignent.



Figure 8.1. Henrietta Leavitt.

Mais c'est le jeune Belge qui déduit, dès 1927, la conséquence cruciale : si nous voyons un caillou s'élever en l'air, cela veut dire

qu'auparavant il était plus bas et que quelque chose l'a expédié vers le haut. Si nous voyons les galaxies s'éloigner et l'Univers s'étendre, c'est que, précédemment, les galaxies étaient proches et l'Univers plus petit, et que quelque chose l'a poussé à entamer son expansion. Le jeune prêtre belge suggère que l'Univers était initialement très petit et comprimé, et qu'il a entamé son expansion lors d'une espèce d'explosion gigantesque. Il appelle cet état initial « atome primordial ». Aujourd'hui, on parle de Big Bang.

Son nom est Georges Lemaître ([figure 8.2](#)). Il n'y a guère de nom plus approprié. Malgré cela, Lemaître avait un caractère timide et réservé, il fuyait les polémiques et n'a jamais rien fait pour que le mérite de la découverte de l'expansion de l'Univers ne soit pas par la suite plus attribué à Hubble qu'à lui. Et cependant, son esprit dominait largement les autres, et nous vivons à l'ombre de cet esprit. Deux épisodes de sa vie en illustrent la profonde intelligence. Le premier concerne Einstein, le second le pape.



Figure 8.2. Georges Lemaître. © Archives Georges Lemaître, Louvain.

Einstein – je l’ai dit – était au début fort sceptique à propos de l’expansion de l’Univers. Il avait grandi avec l’idée d’un Univers immobile et n’avait pas su voir tout de suite qu’il ne l’était pas. Même les très grands se trompent, victimes de leurs préventions. Lemaître a rencontré Einstein et essayé de le débarrasser de ses préjugés. Einstein, au début, a résisté. Il en est même venu à lui dire : « Calculs corrects, physique abominable. » Plus tard, il a dû reconnaître que Lemaître avait raison. Il n’est pas donné à tout le monde de démentir Einstein.

Le fait s’est répété : Einstein avait introduit la constante cosmologique, petite mais importante modification dans ses équations, dans l’espoir (erroné) de rendre ces équations compatibles avec un Univers statique. Quand il a dû admettre que l’Univers n’est pas statique, il a pris en grippe la constante cosmologique. Lemaître, de nouveau, a tenté de le faire changer d’idée : la constante cosmologique ne rend pas l’Univers statique, mais elle peut très bien exister quand même et il n’y a aucune raison de la supprimer. Cette fois encore, Lemaître avait raison : la constante cosmologique produit une accélération de l’expansion de l’Univers, et cette accélération a été récemment mesurée. Encore une fois, Einstein avait tort et Lemaître raison.

Quand l’idée que l’Univers était né d’un Big Bang a commencé à se diffuser, le pape Pie XII a déclaré dans un discours public (le 22 novembre 1951) que la théorie du Big Bang confirmait le récit de la Genèse¹. Lemaître a accueilli cette prise de position papale avec une grande préoccupation et, ayant pris contact avec le conseiller scientifique du pape, il a dû batailler pour le convaincre de ne plus faire de références en public à des relations possibles entre la création divine et le Big Bang. Lemaître était convaincu que mêler de la sorte science et religion était une idiotie : la Bible ne connaît rien à la physique et la physique ne connaît rien à propos de Dieu². Pie XII s’est

laissé convaincre et n'a plus fait aucune allusion en public à cette idée. Il n'est pas donné à tout le monde de démentir le pape.

Assurément, là encore, c'est Lemaître qui avait raison : aujourd'hui, on parle beaucoup de la possibilité que le Big Bang ne soit pas un véritable commencement, qu'il pourrait avoir existé auparavant un autre Univers. Imaginez dans quel embarras se trouverait aujourd'hui l'Église catholique si Lemaître n'avait pas arrêté le pape et si la doctrine officielle était que le Big Bang est la Création. Le « *Fiat lux* » devrait être corrigé en un « Rallumons la lumière » !

Démentir *tout autant* Einstein et le pape, convaincre l'un et l'autre qu'ils se sont trompés, et avoir raison dans les deux cas, voilà un beau résultat. « Le Maître » mérite bien son nom.

Aujourd'hui, les confirmations du fait que l'Univers, dans un lointain passé, a été extrêmement chaud et compact, et qu'il est depuis lors en expansion, se sont accumulées. Nous sommes en mesure de reconstituer en détail l'histoire de l'Univers à partir d'un état initial chaud et comprimé. Nous savons reconstituer la façon dont, à partir de cet état initial, se sont formés les atomes, les éléments, les galaxies, les étoiles et l'Univers tel que nous le voyons aujourd'hui. En 2013, les observations sur le rayonnement diffus qui emplit l'Univers, effectuées par le satellite Planck, ont une fois de plus confirmé pleinement la théorie du Big Bang. Aujourd'hui, donc, nous connaissons avec une certitude raisonnable ce qui est arrivé à grande échelle à notre Univers depuis quatorze milliards d'années, depuis qu'il était une boule de feu chaude et dense.

Et dire que, initialement, le nom un peu ridicule de Big Bang avait été introduit par les adversaires de cette théorie bizarre pour s'en moquer... Finalement, nous sommes tous convaincus qu'il y a quatorze milliards d'années, l'Univers était une boule de feu compacte.

Mais que s'est-il passé *avant* cet état initial chaud et compact ?

Si l'on remonte le temps, la température augmente comme augmente la densité de matière et d'énergie. Il y a un point où elles atteignent l'échelle de Planck, il y a justement quatorze milliards d'années. À ce point, les équations de la relativité générale ne tiennent plus, car on ne peut plus écarter la mécanique quantique. On entre dans le royaume de la gravité quantique.

Cosmologie quantique

Pour comprendre ce qui s'est passé il y a quatorze milliards d'années, la mécanique quantique est ainsi nécessaire. Que nous disent les boucles à ce propos ?

Pensons à une situation semblable, mais bien plus simple. Selon la mécanique classique, un électron qui tombe tout droit vers un noyau se verrait englouti par ce noyau et disparaîtrait. Mais ce n'est pas ce qui se passe en réalité. La mécanique classique est incomplète et il faut tenir compte des effets quantiques. Un électron réel est un objet quantique, il ne suit donc pas une trajectoire précise : il n'est pas possible de le localiser en un point unique pendant plus d'un instant. Et même, plus on le localise avec précision, plus il s'échappe. Si nous voulions l'arrêter autour du noyau, nous pourrions tout au plus le contraindre sur une orbitale de la dimension des orbitales atomiques : il ne pourrait s'approcher davantage du noyau, sauf pour un court instant, avant de s'échapper. La mécanique quantique empêche donc un électron réel de s'effondrer sur le noyau. C'est comme si une force répulsive de nature quantique rejetait l'électron lorsque celui-ci s'approche trop du noyau. Grâce à la mécanique quantique, la matière est stable. Sans elle, tous les électrons s'effondreraient sur les noyaux, il n'y aurait pas d'atomes et nous n'existerions pas.

Il en va de même pour l'Univers. Imaginons un Univers qui se contracte et qui devient très petit, écrasé sous son propre poids. Selon la théorie classique, c'est-à-dire selon les équations d'Einstein, cet Univers s'écroulerait à l'infini et disparaîtrait en un point, comme l'électron qui tombe sur le noyau. Et comme le Big Bang ponctuel prévu par les équations d'Einstein, si nous oublions la mécanique quantique.

Mais si nous tenons compte de la mécanique quantique, alors nous découvrons que l'Univers ne peut pas se comprimer davantage qu'une quantité maximale. C'est comme s'il existait une force quantique répulsive qui le faisait rebondir. Un Univers en contraction ne s'effondre pas en un point, mais rebondit et recommence à s'étendre comme s'il émergeait d'une explosion cosmique ([figure 8.3](#)).



Figure 8.3. Le rebond de l'Univers. Avec l'aimable autorisation de Francesca Vidotto.

Le passé de notre Univers pourrait très bien résulter d'un rebond similaire. Un gigantesque rebond ou, comme on le dit en anglais, un *Big Bounce*, au lieu d'un *Big Bang*. C'est là ce qui semble émerger des équations de la gravité quantique à boucles quand elles sont appliquées à l'expansion de l'Univers.

L'image du rebond ne doit pas être prise à la lettre. C'est plutôt une métaphore. En revenant à l'électron, rappelons-nous que, si nous voulons placer l'électron le plus près possible de l'atome, l'électron n'est plus une particule ; au contraire, nous pouvons le penser comme une nuée de probabilités. La position précise de l'électron n'existe plus. Il en va de même pour l'Univers : dans le passage crucial par le Big Bang, nous ne pouvons plus penser à un espace et à un temps bien définis, mais seulement à une nuée de probabilités où espace et temps ont totalement disparu. Le monde, au Big Bang, est dissous en une nuée grouillante de probabilités, que les équations parviennent encore toutefois à décrire.

Notre Univers pourrait être le résultat de l'effondrement d'un autre Univers, passé par cette phase quantique où espace et temps sont dissous en probabilités.

Naturellement, ici le mot « Univers » devient ambigu. Si, par Univers, nous entendons « tout ce qui est », alors, par définition, il ne peut exister un second Univers. Mais le mot a fini par prendre un autre sens en cosmologie : il indique le continuum spatio-temporel que nous voyons autour de nous, empli de galaxies et dont nous pouvons étudier la géométrie et l'histoire. Il n'y a aucune raison d'être certain que, en ce sens, l'Univers soit le seul existant. En particulier, si nous pouvons reconstituer l'histoire du passé jusqu'à un lieu et un moment où nous savons que, comme dans l'image initiale de John Wheeler, ce continuum spatio-temporel se défait, telle l'écume de la mer, en une nuée quantique de probabilités, eh bien, il n'y a aucune raison de ne

pas prendre au sérieux l'idée que, au-delà de cette écume chaude, il ne puisse pas exister un autre continuum spatio-temporel plus ou moins semblable à celui que nous connaissons.

La probabilité pour un Univers de traverser la phase du Big Bang et de passer d'une phase de contraction à une phase d'expansion peut se calculer au moyen des techniques décrites dans le dernier chapitre : les boîtes d'espace-temps. Elles se somment sur les mousses de spins qui relient un Univers qui se contracte à un Univers en expansion.

Tout cela est encore en phase d'exploration, mais ce qui est extraordinaire dans cette histoire, c'est que nous disposons aujourd'hui d'équations pour tenter de décrire ces faits. Nous commençons à donner quelques premiers coups d'œil timides, pour l'instant seulement théoriques, au-delà du Big Bang.

1. Ce discours se trouve sur le site du Vatican : http://www.vatican.va/holy_father/pius_xii/speeches/1951/documents/hf_p-xii_spe_19511122_di-serena_it.html#top.

2. Voir S. Singh, *Big Bang*, HarperCollins, 2010, p. 362.

CHAPITRE 9

Confirmations empiriques ?

L'intérêt de la cosmologie quantique dépasse de loin la fascination de l'exploration théorique de ce qui pourrait exister au-delà de notre Univers. Il y a une autre raison d'étudier l'application de la théorie à la cosmologie : celle-ci pourrait contribuer à nous dire si la théorie est juste ou pas.

La science fonctionne parce que, après des hypothèses et des raisonnements, des intuitions et des visions, des équations et des calculs, nous pouvons savoir si nous avons bien fait ou pas : la théorie fournit des prédictions sur des choses que nous n'avons pas encore observées et dont nous pouvons vérifier l'exactitude. C'est là la grande force de la science, ce qui lui donne de la crédibilité et qui nous permet de nous fier à elle l'esprit tranquille : nous pouvons vérifier si une théorie est juste ou pas. Et c'est cela qui distingue la science d'autres formes de pensée, où décider de qui a raison et de qui a tort est en général une question bien plus épineuse et parfois même dépourvue de sens.

Quand Lemaître soutient l'idée que l'Univers s'étend et qu'Einstein n'y croit pas, l'un des deux a raison, l'autre tort. Tous les résultats d'Einstein, sa réputation, son influence sur le monde scientifique, son

immense autorité ne comptent pas. Les observations lui donnent tort, et le débat est clos. Cet inconnu, ce petit curé belge a raison. C'est là toute la force de la pensée scientifique.

La sociologie de la science a mis en évidence la complexité du processus d'accroissement de la connaissance scientifique, laquelle, comme toute entreprise humaine, est imprégnée d'irrationalité, recoupe le jeu du pouvoir, et subit toutes sortes d'influences sociales et culturelles. Cependant, malgré tout cela et à l'encontre des exagérations de quelques postmodernes et autres relativistes culturels, cela ne diminue en rien l'efficacité pratique et surtout théorique de la pensée scientifique, fondée sur le fait que, à la fin, on peut le plus souvent établir très clairement qui a raison et qui a tort. Même le grand Einstein doit dire (et il l'a effectivement dit) : « Ah, je me suis trompé ! »

Cela ne signifie pas que la science se réduise à l'art de faire des prédictions mesurables. Certains philosophes des sciences réduisent la science à ses prévisions chiffrées. Selon moi, ils n'ont rien compris à la science : ils confondent les outils avec l'objectif. Les prévisions quantitatives vérifiables servent à examiner les hypothèses. L'objectif de la recherche scientifique n'est pas de faire des prévisions : il est de comprendre comment fonctionne le monde. D'élaborer et de développer une image du monde, une structure conceptuelle pour le penser. Avant d'être technique, la science est visionnaire.

Les prédictions vérifiables sont l'arme effilée qui nous permet de dire quand nous avons mal compris. Une théorie sans confirmation fondée sur l'observation est une théorie qui n'a pas encore fait ses preuves. Les preuves n'en finissent jamais, et une théorie n'est jamais complètement confirmée par une expérience, ou deux, ou trois. La théorie devient toujours plus crédible à mesure que ses prédictions se révèlent exactes. Des théories comme la relativité générale et la

mécanique quantique, qui au début en laissaient beaucoup perplexes, ont gagné en crédibilité à mesure que toutes leurs prévisions, y compris les plus inattendues et extravagantes, étaient confirmées par des expériences et des observations.

L'importance des preuves expérimentales ne signifie cependant pas que, sans données expérimentales nouvelles, on ne peut pas progresser. Souvent, on entend dire que la science ne progresse que quand il y a des données expérimentales nouvelles. Si c'était vrai, nous aurions bien peu d'espoir de trouver la théorie de la gravité quantique avant d'avoir mesuré quelque chose de nouveau ; mais ce n'est pas vrai. De quelles données nouvelles Copernic disposait-il ? D'aucune. Les mêmes que Ptolémée. Quelles données nouvelles Newton avait-il ? Pratiquement aucune. Ses vrais ingrédients étaient les lois de Kepler et les résultats de Galilée. Quelles données nouvelles Einstein avait-il pour trouver la relativité générale ? Aucune. Ses ingrédients sont la relativité restreinte et la théorie de Newton. Il n'est pas vrai que la physique ne progresse que lorsqu'elle dispose de données nouvelles.

Ce qu'ont fait Copernic, Newton, Einstein et beaucoup d'autres a été de bâtir à partir de théories déjà existantes, qui synthétisaient la connaissance empirique dans de vastes champs de la nature, et de trouver la manière de les combiner et de les repenser mieux.

Tel est le socle sur lequel évolue la meilleure recherche en gravité quantique. L'origine du savoir, comme toujours en science, est certes empirique. Mais les données sur lesquelles on construit la gravité quantique ne sont pas des expérimentations nouvelles : ce sont les constructions théoriques qui ont déjà structuré notre savoir sur le monde sous des formes partiellement cohérentes. Les « données expérimentales » pour la gravité quantique sont la relativité générale et la mécanique quantique. En bâtissant à partir d'elles, en essayant de comprendre comment peut être fait un monde cohérent dans lequel

existeraient les quanta et où l'espace serait courbe, nous essayons de regarder vers l'inconnu.

L'immense succès des géants qui nous ont précédés dans de semblables entreprises, tels Newton, Einstein ou Dirac, nous encourage. Nous ne prétendons pas avoir leur stature. Mais nous avons l'avantage d'être assis sur leurs épaules, d'où nous pouvons essayer de regarder plus loin qu'eux. En tout cas, nous ne pouvons pas ne pas essayer.

Il convient de distinguer les indices des preuves. Les indices sont ce qui met Sherlock Holmes sur la bonne piste et lui permet de résoudre l'affaire mystérieuse. Les preuves sont ce dont le juge a besoin pour envoyer le coupable en prison. Les indices servent à nous mettre sur la voie de la bonne théorie, les preuves sont ce qui confirment ou pas, ensuite, que la théorie trouvée est la bonne. Sans indices, nous cherchons dans de mauvaises directions. Sans preuves, nous restons dans le doute.

Cela vaut également pour la gravité quantique. La théorie est dans son enfance. Son appareil théorique se consolide peu à peu et ses idées de base se précisent, les indices sont bons et solides, mais il manque encore la confirmation des prévisions. La théorie n'a pas encore fait ses preuves.

Des signaux de la nature

Toutefois, les signes que nous envoie la nature me semblent encourageants.

L'alternative la plus étudiée à la recherche décrite dans ce livre est la théorie des cordes. La plupart des physiciens qui travaillent sur la théorie des cordes, ou sur des théories liées aux cordes, s'attendaient

que, dès qu'aurait été mis en marche le nouveau grand accélérateur de particules du Cern de Genève, appelé LHC (*Large Hadron Collider*, grand collisionneur de hadrons), on verrait aussitôt des particules de la nouvelle espèce prévue par la théorie des cordes et jusque-là jamais observées : les particules supersymétriques. La théorie des cordes a besoin de ces particules pour être consistante, c'est pourquoi les « cordistes » s'attendaient à les trouver. La théorie de la gravité quantique à boucles, en revanche, est bien définie même sans particules supersymétriques. Et donc, les « bouclistes » s'attendaient plutôt que ces particules n'existent pas.

Les particules supersymétriques ne se sont pas manifestées, à l'immense déception de beaucoup. Le grand tapage qui a suivi la révélation de la particule de Higgs en 2013 a servi aussi à masquer cette déception. Les particules supersymétriques ne sont pas là, à l'énergie où de nombreux cordistes les attendaient. Ce n'est certes pas une preuve définitive de quelque chose, loin de là ; mais il me semble que la nature, entre deux alternatives, a donné un petit indice favorable aux bouclistes.

On peut compter deux résultats expérimentaux importants de 2013, en ce qui concerne la physique fondamentale. Le premier, c'est la révélation du boson de Higgs au Cern de Genève, dont ont beaucoup parlé tous les journaux du monde ([figure 9.1](#)). Le second, ce sont les mesures du satellite *Planck* ([figure 9.2](#)), dont les données ont été publiées en 2013. Ce sont les deux signes que nous a donnés récemment la nature.

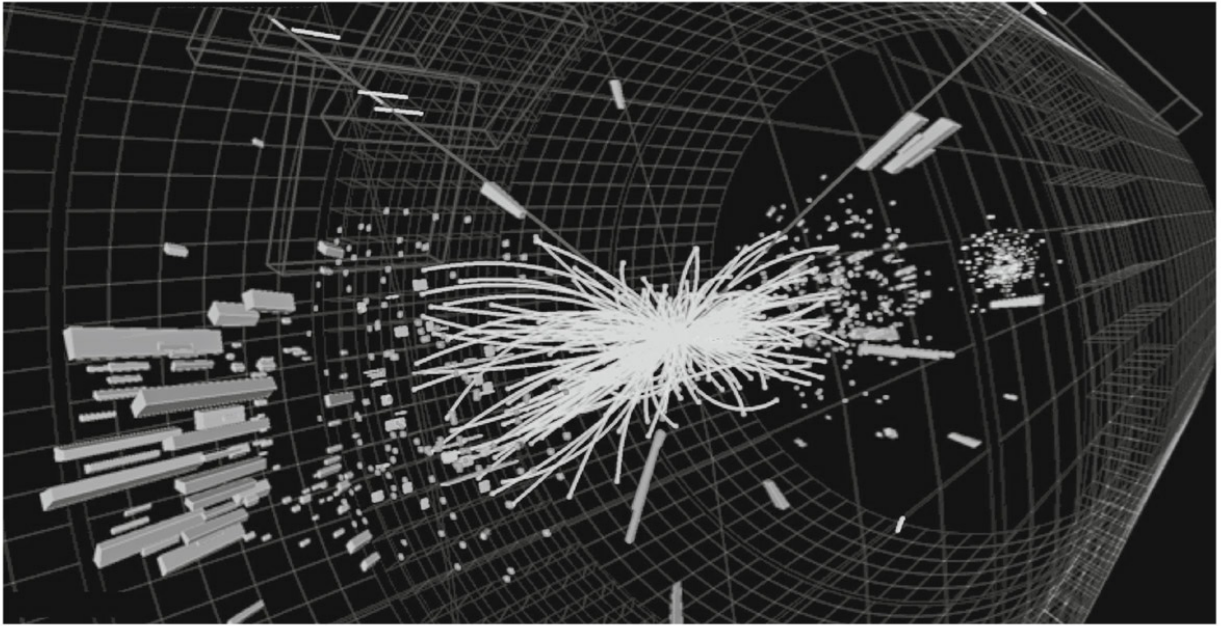


Figure 9.1. Un événement au Cern montre la formation d'une particule de Higgs.

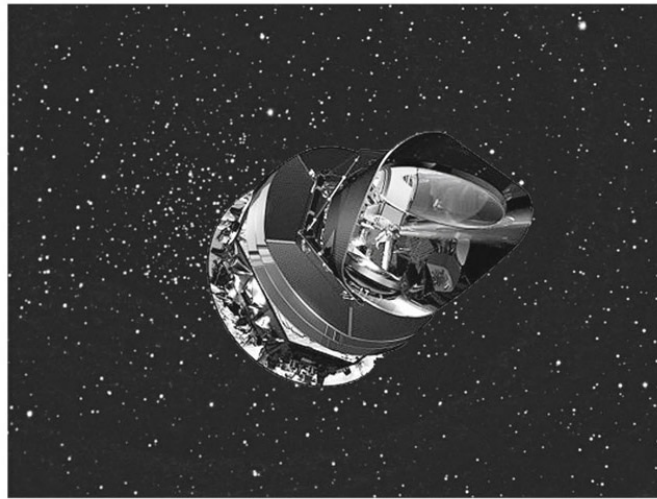


Figure 9.2. Le satellite *Planck*.

Il y a un point commun à ces deux résultats : l'absence totale de surprise. La découverte du boson de Higgs est une solide confirmation du modèle standard des particules élémentaires, fondé sur la mécanique quantique. C'est la vérification d'une prévision faite il y a trente ans. Les mesures de *Planck* sont une solide confirmation du modèle standard cosmologique, fondé sur la relativité générale avec la constante cosmologique. Les deux résultats, obtenus au prix de grands efforts technologiques déployés par de grandes collaborations de scientifiques et à des coûts notables, ne font que renforcer l'image que nous avons de l'évolution de l'Univers. Aucune véritable surprise. Mais cette absence de surprises a été surprenante, car beaucoup s'attendaient à des surprises. On s'attendait à la supersymétrie, au Cern, non au boson de Higgs. Et beaucoup s'attendaient que le satellite *Planck* mesure des écarts, par rapport au modèle standard cosmologique, qui soutiendraient telle ou telle théorie cosmologique alternative à la relativité générale.

Eh bien non. Ce que la nature nous dit est simple : relativité générale, mécanique quantique et, dans le cadre de la mécanique quantique, modèle standard.

Beaucoup de physiciens théoriciens, aujourd'hui, cherchent des théories nouvelles en émettant des hypothèses hasardeuses et arbitraires. « Imaginons que... » Je ne crois pas que cette façon de faire de la science ait jamais donné de bons résultats. Notre imagination est trop limitée pour « imaginer » comment le monde peut être fait sans nous servir des traces dont nous disposons. Ces traces, nos indices, ce sont les théories qui ont eu du succès et les données expérimentales, rien de plus. C'est dans ces données et dans ces théories que nous devons essayer de débusquer ce que nous n'avons pas encore su imaginer. C'est ainsi qu'ont procédé Copernic, Newton, Maxwell ou Einstein. Ils n'ont jamais « essayé d'imaginer » une nouvelle théorie,

comme le font justement aujourd'hui, à mon avis, trop de physiciens théoriciens.

C'est comme si les deux résultats expérimentaux de 2013 parlaient avec la voix de la nature : « Cessez de rêver à de nouveaux champs et à des particules bizarres, à des dimensions supplémentaires, à d'autres symétries, à des univers parallèles, à des cordes et à je ne sais quoi encore. Les données du problème sont simples : relativité générale, mécanique quantique et modèle standard. Il s'agit "seulement" de les combiner correctement. » C'est là une indication qui nous conforte dans la direction de la gravité quantique à boucles, car ce sont là les hypothèses de la théorie : relativité générale, mécanique quantique et compatibilité avec le modèle standard, rien de plus. Les conséquences conceptuelles radicales, les quanta d'espace, la disparition du temps, ne sont pas des hypothèses hardies, mais les conséquences du choix consistant à prendre au sérieux deux théories et à en tirer les conséquences.

Encore une fois, cependant, ce ne sont certainement pas là des preuves définitives. Des particules supersymétriques, par exemple, pourraient exister à une échelle non encore atteinte, et après tout elles pourraient exister même si la théorie des boucles est exacte. Et donc, même s'il est vrai que, depuis que la supersymétrie ne s'est pas manifestée là où on l'attendait, les cordistes font un peu grise mine, et les bouclistes se montrent un peu plus souriants, il ne s'agit encore que d'indices, non de preuves.

Pour obtenir des confirmations plus solides à la théorie, il faut chercher ailleurs, et l'Univers primordial pourrait ouvrir la fenêtre là où les prédictions de la théorie pourraient être confirmées dans un futur, espérons-le, pas trop éloigné. Ou bien contredites.

Une fenêtre sur la gravité quantique

Si nous disposons des équations qui décrivent le passage de l'Univers par la phase quantique initiale, nous pouvons calculer les effets des phénomènes quantiques primordiaux sur l'Univers observable aujourd'hui. Aujourd'hui, l'Univers conserve de nombreuses traces de faits initiaux. Il est tout entier rempli du rayonnement cosmique de fond : un océan de photons emplissant le cosmos, la lueur résiduelle de la grande fournaise initiale.

En d'autres termes, le champ électromagnétique dans l'espace immense entre les galaxies n'est pas nul, mais il tremble comme la surface de la mer après une tempête. Ce tremblement diffus dans tout l'Univers est le *rayonnement cosmique de fond*. Il a été étudié durant ces dernières années par des satellites tels que *COBE* (lancé en 1989), *WMAP* (2001) et, récemment, *Planck*. Une image des fluctuations infimes de ce rayonnement est présentée à la [figure 9.3](#). Les détails de la structure nous racontent l'histoire de l'Univers et, cachée entre les plis de ces détails, pourrait se trouver la trace du début quantique de l'Univers.

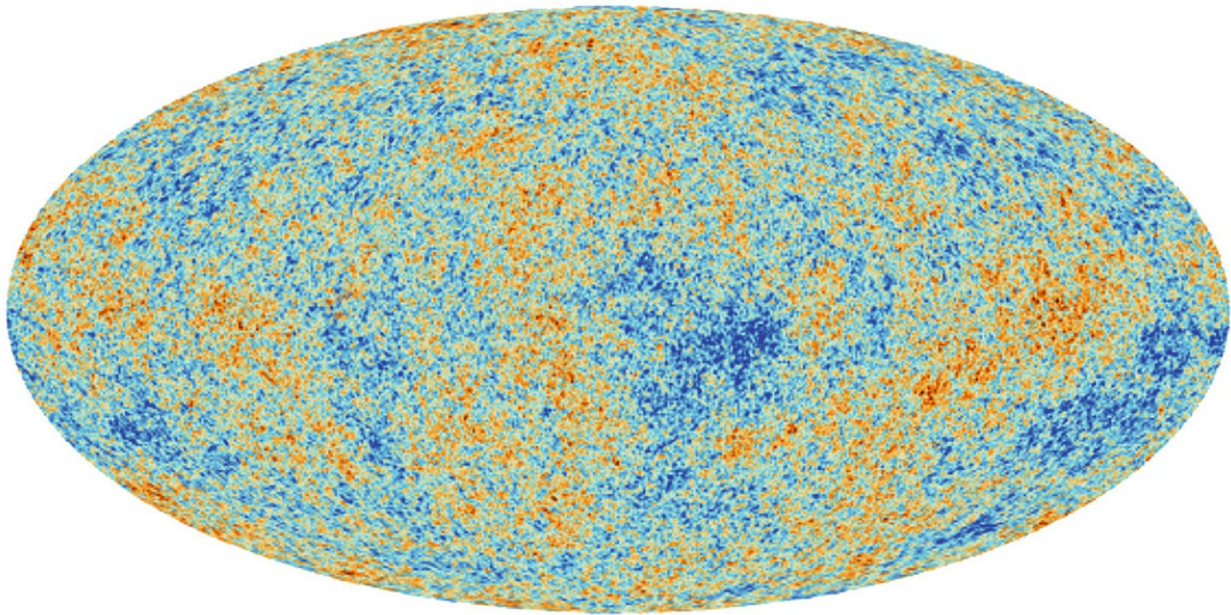


Figure 9.3. Les fluctuations du rayonnement cosmique de fond. Telle est l'image de l'objet le plus ancien de l'Univers dont nous disposons. Ces fluctuations ont été produites il y a quatorze milliards d'années. Dans la statistique de ces fluctuations, nous espérons trouver des confirmations des prévisions de la gravité quantique.

Un des secteurs les plus actifs de la recherche en gravité quantique à boucles étudie actuellement dans quelle mesure la dynamique quantique de l'Univers primordial se reflète dans ces données. Les résultats sont prématurés mais encourageants. Rien n'est certain, mais avec davantage de calculs et des mesures plus précises, on devrait arriver à un vrai test de la théorie.

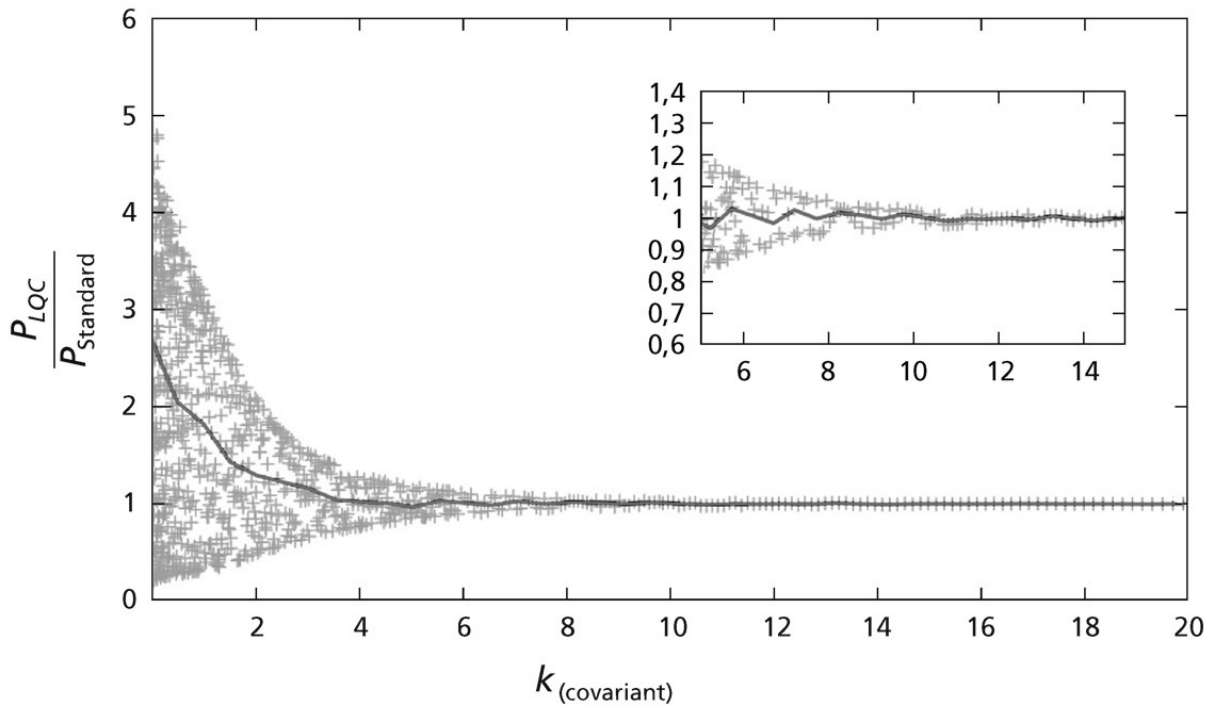


Figure 9.4. Prévision possible sur le spectre du rayonnement de fond de la gravité quantique à boucles (ligne continue), confrontée à l'erreur expérimentale actuelle (points). Avec l'aimable auto-risation de A. Ashtekar, I. Agullo et W. Nelson.

En 2013, Abhay Ashketar, Ivan Agullo et William Nelson ont publié un article dans lequel ils calculent que, à certaines conditions, la distribution statique des fluctuations de ce fond de rayonnement cosmique devrait se ressentir du sursaut initial de l'Univers : les fluctuations à grand angle devraient être plus importantes que celles prévues par la théorie, qui ne tient pas compte des quanta. L' tat actuel de la mesure est décrit à la [figure 9.4](#), où la ligne noire est la prévision d'Ashtekar, Agullo et Nelson et les points gris les données expérimentales. Comme on le voit, elles ne sont pour l'instant pas suffisantes pour dire si la courbe au-dessus de la ligne noire, prévue par les trois auteurs, est la bonne ou pas. Les mesures se rapprochent de la possibilité de tester la théorie, mais elles n'y sont pas encore. En

outre, nous ne sommes pas certains que les hypothèses particulières du calcul de ces trois auteurs soient justes. La situation est donc encore fluide. Mais tous ceux qui, comme moi, ont passé leur vie à essayer de percer les secrets de l'espace quantique, suivent avec attention, inquiétude et espoir l'affinement continu de nos capacités d'observation, de mesure et de calcul, et guettent le moment où la nature nous dira si nous avons raison, ou pas.

Le champ gravitationnel lui aussi doit porter des traces de la grande chaleur initiale. Le champ gravitationnel lui aussi, à savoir l'espace même, doit trembler comme la surface de la mer. Il doit donc exister aussi un rayonnement de fond *gravitationnel*, plus ancien que l'autre, car les ondes gravitationnelles, moins perturbées par la matière que les ondes électromagnétiques, ont pu voyager sans encombre lorsque l'Univers était trop dense pour laisser passer les ondes électromagnétiques.

Les ondes gravitationnelles, nous ne les avons pas encore observées directement, mais elles sont prédites par les équations d'Einstein ; nous en voyons clairement les effets sur les systèmes d'étoiles et nous sommes convaincus qu'elles existent. Plusieurs détecteurs dans le monde sont en train de s'affiner pour tenter de les capter. L'un des plus grands se trouve en Italie, près de Pise, et il s'appelle VIRGO. Il est formé de deux tubes longs de 2 kilomètres, disposés à angle droit, où des faisceaux laser mesurent la distance entre trois points fixes. Lorsque passe une onde gravitationnelle, l'espace se déforme imperceptiblement, mais les lasers devraient déceler une variation infime de la longueur des deux bras¹.

Une expérience bien plus ambitieuse, appelée LISA (eLISA, dans sa dernière incarnation, tout européenne) est en phase d'évaluation et consiste à faire de même à une bien plus grande échelle : placer sur orbite trois satellites, non pas autour de la Terre, mais autour du Soleil,

comme s'il s'agissait de petites planètes, de façon qu'ils suivent à une certaine distance la Terre sur son orbite. Les trois satellites seront reliés par trois rayons laser mesurant les distances entre eux ou, mieux, les variations dans les distances lorsque passera une onde gravitationnelle. Si eLISA est lancée, elle devrait voir les ondes gravitationnelles avec une certitude raisonnable, et peut-être ouvrir la voie à l'observation du fond diffus de ces ondes, généré en un temps très proche du Big Bang.

Dans les infimes ridules de l'espace autour de la Terre, nous devrions parvenir à trouver des traces d'événements advenus il y a quatorze milliards d'années, à l'origine de notre Univers, et en obtenir la confirmation de nos déductions sur la nature de l'espace et du temps.

1. Il s'agit d'un « interféromètre » : il fait interférer les deux faisceaux laser qui se propagent dans les deux bras et se réfléchissent sur des miroirs à leurs extrémités pour révéler des variations infimes de longueur de ces bras.

CHAPITRE 10

La chaleur des trous noirs

Les trous noirs sont des objets qui peuplent notre Univers. Ce sont des régions où l'espace est tellement courbe qu'il s'effondre sur lui-même, et où le temps ralentit jusqu'à s'arrêter. Ils se forment par exemple quand une étoile a brûlé tout l'hydrogène dont elle est constituée et qu'elle s'effondre sous son propre poids.

Souvent, l'étoile effondrée faisait partie d'un couple d'étoiles voisines, et alors le trou noir et sa compagne subsistante tournent l'un autour de l'autre, le trou noir aspirant continuellement la matière de l'autre étoile (comme sur la [figure 10.1](#)).

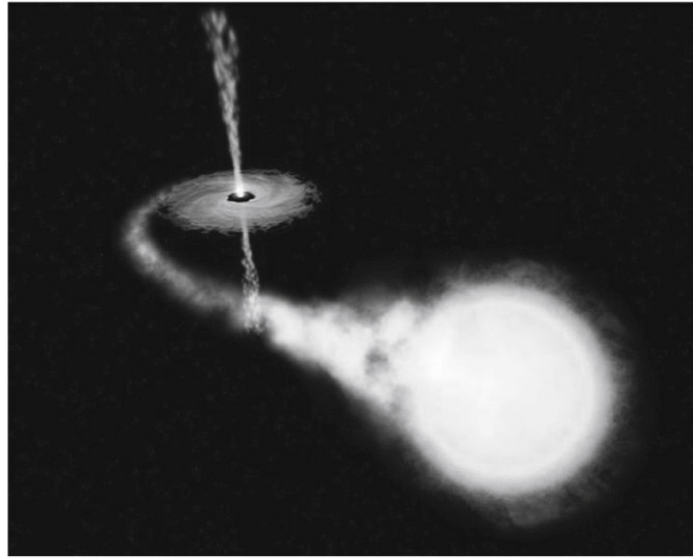


Figure 10.1. Représentation d'un couple étoile-trou noir. L'étoile perd de sa matière qui est en partie absorbée par le trou noir, en partie projetée par ce dernier en jets dans les axes de ses pôles.

Les astronomes ont repéré de nombreux trous noirs d'une dimension (d'une masse) semblable à celle d'étoiles comme notre Soleil. Mais aussi des trous noirs gigantesques. On en trouve au centre de presque toutes les galaxies, y compris la nôtre.

Celui qui est au centre de notre Galaxie est aujourd'hui étudié en détail. Sa masse est un million de fois celle de notre Soleil. Des étoiles tournent autour de lui, comme les planètes autour de notre Soleil. De temps en temps, une étoile s'approche trop de ce géant monstrueux ; elle est désagrégée par la force de gravitation et engloutie par le trou noir cyclopéen comme un petit poisson avalé par un requin. Imaginez un monstre grand comme un million de Soleil qui engloutit en un instant notre Soleil et ses petites planètes...

Un très beau projet en cours, dont on espère des résultats dans les toutes prochaines années, est la construction d'un réseau d'antennes

radio disséminées sur la Terre d'un pôle à l'autre, au moyen duquel les astronomes espèrent obtenir de très petits angles de résolution, qui nous feront littéralement « voir » notre trou noir galactique. Ce qu'on devrait voir, c'est un petit disque noir cerclé par la lumière produite par le rayonnement de la matière qui tombe à l'intérieur du terrible trou.

Ce qui entre dans le trou noir n'en ressort plus. Pas même la lumière. La surface d'un trou noir est comme un présent qui s'est renfermé dans une sphère : au-delà de la sphère, il y a un futur, et du futur on ne revient pas en arrière.

Comprendre ce qu'est un trou noir n'est pas difficile. Il suffit de se rappeler qu'il existe une vitesse maximale, la vitesse de la lumière, qu'aucun objet ne peut dépasser. Imaginez que vous lanciez une balle en l'air. La balle retombera. Mais si vous la lancez avec une vitesse suffisante, elle réussira à s'arracher à l'attraction de la Terre et à lui échapper. La vitesse minimale pour s'échapper est appelée « vitesse d'évasion ». Sur la Terre, elle vaut environ 11 kilomètres par seconde. Elle est élevée, mais elle est bien plus basse que la vitesse de la lumière. Plus une planète, ou une étoile, est massive et comprimée, plus grande est la vitesse d'évasion. Une étoile peut être tellement massive et comprimée que la vitesse d'évasion deviendra supérieure à la vitesse de la lumière. Même la lumière n'aura pas assez de vitesse pour échapper à l'attraction gravitationnelle. Un rayon de lumière qui part vers le haut finit par retomber, après avoir atteint une hauteur maximale. Et comme la vitesse de la lumière est une vitesse maximale et que rien ne peut dépasser la lumière, il s'ensuit que *n'importe quel* objet retombera en arrière, et que rien ne pourra s'échapper. Voilà ce qu'est un trou noir : vu du dehors, c'est comme une sphère dans laquelle on ne peut qu'entrer, mais dont on ne ressort jamais.

Une fusée pourrait se tenir à une certaine distance de cette sphère maximale, appelée *horizon* du trou noir. Mais, pour cela, elle devrait

maintenir ses moteurs à très haut régime afin de résister à la force d'attraction gravitationnelle du trou. La forte gravité qu'elle rencontrerait ferait que, si quelqu'un était à l'intérieur de la fusée, le temps ralentirait considérablement pour lui. Au bout d'une heure près de l'horizon, la fusée pourrait s'éloigner, et ce personnage pourrait découvrir que, ailleurs, des siècles se sont écoulés. Plus la fusée reste proche de l'horizon, plus pour lui le temps ralentit, et plus le temps extérieur s'écoule rapidement pour lui. (Voyager dans le passé est difficile, mais voyager dans le futur, en principe, est facile : il suffit de s'approcher avec un vaisseau spatial d'un trou noir, et de rester un moment dans son voisinage avant de s'en éloigner. Ailleurs, il peut s'être écoulé des milliers d'années.) Sur l'horizon même, le temps s'arrête : si nous nous approchons de lui et si nous nous en éloignons après quelques minutes (de *nos* minutes), dans le reste de l'Univers peuvent s'être écoulées des millions d'années.

Le plus surprenant, c'est que les propriétés de ces objets étranges communément observés aujourd'hui ont été *prévues* par la théorie d'Einstein, avant d'être effectivement observées. Aujourd'hui, les astronomes étudient ces objets dans le ciel, mais il y a seulement quelques années, les trous noirs étaient une étrange conséquence de la théorie, à laquelle bien peu accordaient de crédit. Je me souviens que mon professeur d'université les avait introduits comme solutions des équations d'Einstein, auxquelles il était improbable que puissent correspondre des objets réels. En revanche, la capacité stupéfiante de la physique théorique de découvrir des objets avant de les voir s'est une fois de plus vérifiée lorsque la réalité de ces objets dans le ciel a commencé à s'imposer peu à peu.

Les trous noirs que nous observons sont bien décrits par la théorie d'Einstein et, en général, on n'a pas besoin de la mécanique quantique pour les comprendre. Mais il y a deux aspects mystérieux de leurs

propriétés qui réclament qu'on tienne compte de la mécanique quantique, et pour chacun d'eux la théorie des boucles a une solution.

Une fois effondrée sous l'effet de son propre poids, une étoile disparaît aux regards extérieurs parce qu'elle est à l'intérieur de son trou noir. Mais que se passe-t-il à l'intérieur d'un trou noir ? Que verrions-nous si nous nous y laissions entraîner ? Au début, rien de particulier : nous traverserions la surface du trou noir sans dommages particuliers, surtout s'il est assez grand, mais ensuite nous nous enfoncerions rapidement vers le centre, en tombant de plus en plus vite. Et à ce stade-là ? À ce stade, la relativité générale prévoit que tout se concentre en un seul point infiniment petit, pour arriver, comme dans le Big Bang, à une concentration infinie. Cela, du moins, si nous négligeons la gravité quantique.

Si, en revanche, nous en tenons compte, cette prévision n'est plus correcte, car elle oublie cette force répulsive qui fait rebondir l'Univers au Big Bang. Ce à quoi nous devons nous attendre, c'est que, en approchant du centre, la matière qui tombe soit ralentie par cette force et qu'elle atteigne une densité haute mais non infinie. Elle se concentre, mais pas au point de se condenser en un point infiniment petit. Il y a une limite à la petitesse. C'est là la première application des boucles à la physique des trous noirs ([figure 10.2](#)).

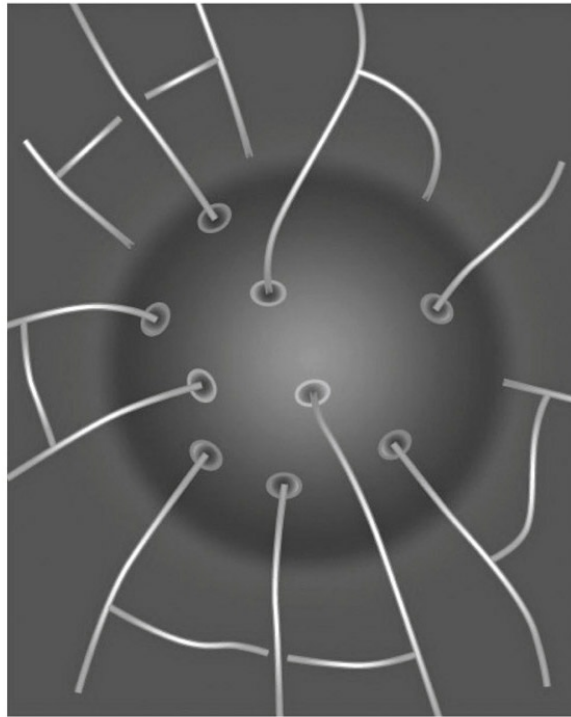


Figure 10.2. La surface d'un trou noir est traversée par les boucles, c'est-à-dire par les lignes du réseau de spins qui déterminent l'état du champ gravitationnel. Chaque boucle qui entre détermine l'existence d'un quantum individuel d'aire sur la surface du trou noir. © John Baez.

La deuxième application concerne un fait curieux lié aux trous noirs. C'est Stephen Hawking qui l'a découvert, le physicien anglais devenu célèbre parce qu'il a réussi à poursuivre ses travaux tout en étant cloué sur son fauteuil roulant par une grave maladie, et contraint à communiquer uniquement à l'aide d'un ordinateur. Au début des années 1970, Hawking a découvert (par la voie théorique) que les trous noirs sont « chauds ». C'est-à-dire qu'ils se comportent comme des corps chauds : ayant une certaine température, ils émettent de la chaleur. À mesure qu'ils émettent de la chaleur, ils perdent de l'énergie et donc de la masse (énergie et masse sont la même chose), devenant

peu à peu plus petits. On dit que les trous noirs « s'évaporent ». Cette évaporation des trous noirs est la découverte la plus importante de Hawking. Il est possible que la gravité quantique empêche la matière de s'effondrer complètement. Une étoile atteindrait alors un rayon petit mais fini. On appelle cette configuration « étoile de Planck ». Et cette étoile pourrait rebondir sur elle-même et faire exploser le trou noir. Aurélien Barrau à Grenoble, mon équipe à Marseille et Francesca Vidotto aux Pays-Bas évaluent la possibilité d'observer des effets de cette explosion de trou noir causée par la gravité quantique.

Combien de temps la matière reste-t-elle piégée dans un trou noir ? La question est trompeuse, car le temps qui passe pour des personnes différentes peut très bien être différent. Pour un observateur extérieur, un morceau de matière tombé dans un trou noir y restera piégé pendant un temps très long. Pour être libéré, le morceau de matière doit attendre l'évaporation du trou noir, ce qui est un phénomène très lent. Pour un trou noir de la masse d'une étoile – comme notre Galaxie en compte beaucoup –, il s'écoule une éternité avant l'évaporation complète, et toutes les étoiles du ciel, d'ici là, se seront éteintes.

Sinon – rappelez-vous –, plus on s'approche d'une masse, plus le temps ralentit. Pour la matière qui tombe dans le trou noir, ce temps est extrêmement ralenti. Si nous jetons une montre (très résistante !) dans un trou noir, elle en ressortira au bout d'un temps très long, mais elle n'aura mesuré qu'un temps très court. Si nous entrons dans un trou noir, nous en sortirons aussitôt dans un lointain futur. Au fond, un trou noir est un raccourci pour le futur lointain.

En général, les objets sont chauds parce que leurs constituants microscopiques s'agitent. Un morceau de fer chaud, par exemple, est un morceau de fer dont les atomes vibrent très vite autour de leurs positions d'équilibre. L'air chaud est de l'air dont les molécules s'agitent plus vite que celles de l'air froid.

Si un trou noir est chaud, quels sont ses « atomes » élémentaires qui vibrent ? Tel est le problème que Stephen Hawking avait laissé ouvert. La théorie des boucles offre une réponse à cette question. Les « atomes » élémentaires du trou noir qui vibrent, responsables de sa température, sont les quanta d'espace qui sont à sa surface.

Le recours à la théorie des boucles a permis d'expliquer l'étrange chaleur des trous noirs prédite par Hawking : elle résulte des « vibrations » microscopiques des boucles, des atomes d'espace. Ceux-ci vibrent parce que, dans le monde de la mécanique quantique, tout vibre, et rien ne reste jamais immobile. L'impossibilité pour un objet d'être toujours parfaitement immobile dans un lieu précis est au cœur de la mécanique quantique. La chaleur des trous noirs peut être liée directement aux fluctuations des atomes d'espace de la gravité quantique à boucles.

La position précise de l'horizon du trou noir est déterminée seulement à partir de ces fluctuations microscopiques du champ gravitationnel. En un certain sens, l'horizon fluctue comme un corps chaud.

Il y a une façon plus subtile d'expliquer l'origine de la chaleur des trous noirs. Les fluctuations quantiques impliquent une corrélation entre l'intérieur et l'extérieur du trou noir. (Je parlerai plus longuement de corrélations et de température au chapitre 12.) L'incertitude qui caractérise la mécanique quantique existe aussi « à cheval » sur l'horizon du trou noir. Comme ce qui est au-delà de l'horizon échappe à notre vue, cette incertitude devient une raison supplémentaire de fluctuation de tout objet proche de la surface du trou noir. Mais qui dit fluctuations dit probabilité, donc statistique, donc thermodynamique, et donc température. En nous masquant une partie de l'Univers, un trou noir fait apparaître les fluctuations quantiques sous forme de chaleur.

C'est un jeune scientifique italien qui a complété un très élégant calcul qui montre comment, à partir de ces idées et des équations de base de la gravité quantique à boucles, on peut obtenir la formule pour la chaleur des trous noirs prévue par Hawking. Il s'appelle Eugenio Bianchi et il est aujourd'hui professeur de physique aux États-Unis (figure 10.3).

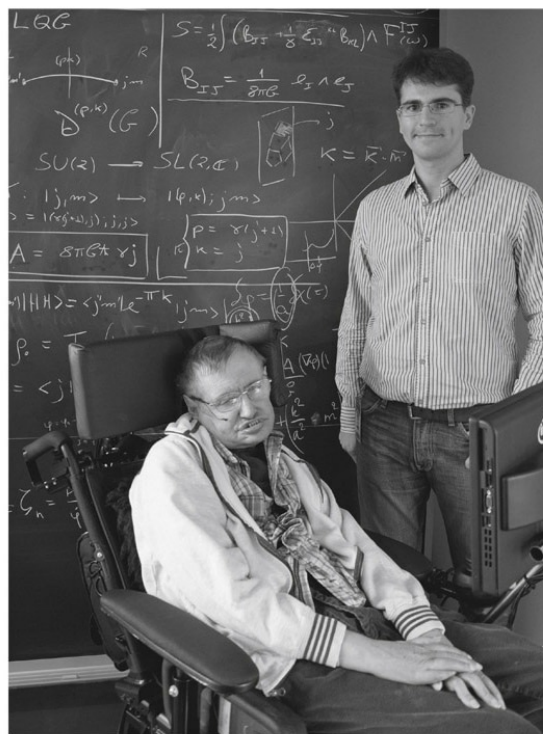


Figure 10.3. Stephen Hawking et Eugenio Bianchi. Au tableau figurent les principales équations de la gravité quantique à boucles qui décrivent les trous noirs. Avec l'aimable autorisation d'Eugenio Bianchi.

CHAPITRE 11

La fin de l'infini

La concentration infinie de l'Univers en un seul point infiniment petit, prévue au moment du Big Bang par la relativité générale, disparaît quand on tient compte de la gravité quantique. La raison, au fond, en est simple : la gravité quantique est justement la découverte qu'il n'existe pas de points infiniment petits. Il existe une limite inférieure à la divisibilité de l'espace. L'Univers ne peut pas être plus petit que l'échelle de Planck, car il n'existe rien de plus petit que cette échelle.

Si nous ignorons la mécanique quantique, alors nous ignorons l'existence de cette limite inférieure. Les situations pathologiques prévues par la relativité générale, où la théorie prévoit des quantités infinies, sont dites des « singularités ». La gravité quantique pose une limite à l'infini, et « soigne » les singularités de la relativité générale.

La même chose, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, se produit au centre d'un trou noir : la singularité prévue par la relativité générale classique disparaît dès qu'on tient compte de la gravité quantique.

Il y a un autre cas, de nature différente, où la gravité quantique pose une limite à l'infini ; il concerne les forces comme

l'électromagnétisme. La théorie des champs quantiques, dont l'élaboration a été entamée par Dirac et complétée dans les années 1950 par Feynman et d'autres, décrit bien ces forces, mais c'est une théorie pleine d'absurdités mathématiques. Quand on s'en sert pour calculer des processus physiques, on obtient en général des résultats infinis, qui ne signifient rien. On les appelle des « divergences ». Ces infinis sont alors éliminés par le résultat des calculs à l'aide d'une procédure technique qui conduit à des résultats finis. Concrètement, cela fonctionne. Et les chiffres, à la fin, sont justes, c'est-à-dire qu'ils reproduisent les mesures expérimentales. Mais pourquoi diable la théorie doit-elle effectuer ce passage absurde par l'infini pour produire des chiffres raisonnables ?

Dans les dernières années de sa vie, Dirac se sentait insatisfait à cause de ces infinis dans la théorie, et il avait le sentiment que, tout bien considéré, son objectif de comprendre vraiment comment fonctionnent les choses n'avait pas eu de succès. Dirac aimait la clarté conceptuelle, même si, souvent, ce qui était clair pour lui ne l'était pas pour les autres. Mais les infinis ne sont pas des éléments de clarté.

Toutefois, les infinis de la théorie quantique des champs découlent tous d'une hypothèse à la base de cette théorie : l'infinie divisibilité de l'espace. Par exemple, pour calculer les probabilités d'un processus, on peut considérer – comme nous l'a enseigné Feynman – toutes les façons dont ce processus peut se dérouler, mais il y en a un nombre infini, puisqu'elles peuvent advenir dans n'importe lequel des points infinis d'un espace continu. Il s'ensuit que, souvent, le résultat du calcul est infini.

Quand on tient compte de la gravité quantique, même ces infinis disparaissent. La raison en est claire : l'espace n'est pas infiniment divisible, il n'y a pas de points infinis, et il n'y a pas de choses infinies à additionner. La structure granulaire et discrète de l'espace résout les

difficultés de la théorie quantique des champs en éliminant les infinis qui l'affligent. Magnifique : d'un côté, tenir compte de la mécanique quantique résout les problèmes créés par les infinis de la théorie de la gravité d'Einstein, c'est-à-dire les singularités. De l'autre, tenir compte de la gravité résout les problèmes généraux de la théorie quantique des champs, à savoir les divergences. Loin d'être contradictoires, comme elles semblaient l'être à première vue, chacune des deux théories est la solution aux problèmes de l'autre ! Cela renforce beaucoup la crédibilité de la théorie.

Poser une limite à l'infini est un thème récurrent de la physique moderne. La relativité restreinte peut être résumée à la découverte qu'il existe une vitesse maximale pour tous les systèmes physiques. La mécanique quantique peut se résumer à la découverte qu'il existe une information maximale dans tout système physique. La longueur minimale est la longueur de Planck L_p , la vitesse maximale est celle de la lumière c , et l'information unitaire est déterminée par la constante de Planck, $\hbar$. Le tout est résumé dans le [tableau 11.1](#).

Tableau 11.1. Limitations fondamentales découvertes par des théories physiques de base.

Quantité physique	Constante fondamentale	Théorie	Découverte
Vitesse	c	Relativité restreinte	Il existe une vitesse maximale
Information (action)	$\hbar$	Mécanique quantique	Il existe une information minimale
Longueur	L_p	Gravité	Il existe une longueur quantique minimale

L'existence de ces valeurs minimales, et maximale pour la longueur, la vitesse et l'action détermine un système d'unités de mesure naturelles. Au lieu de mesurer la vitesse en kilomètres par heure, ou en mètres par seconde, nous pouvons la mesurer en fractions de la vitesse de la lumière. C'est-à-dire que nous pouvons établir par définition la valeur 1 pour la vitesse c , et affirmer, par exemple, que $v = \frac{1}{2}$ pour dire qu'un corps se déplace à une vitesse de moitié inférieure à celle de la lumière. De même, nous pouvons poser que $L_p = 1$ par définition et mesurer des longueurs en multiples de la longueur de Planck. Enfin, nous pouvons poser $\hbar = 1$ et mesurer les actions en multiples de la constante de Planck. En procédant ainsi, nous aurons un système naturel d'unités fondamentales duquel découleront les autres. Par exemple, l'unité de temps sera le temps que met la lumière pour couvrir une longueur de Planck, et ainsi de suite. Ces unités naturelles sont utilisées communément dans la recherche en gravité quantique.

Mais il découle de ces découvertes une conséquence bien plus profonde. La détermination de ces trois constantes fondamentales pose une limite à ce que nous semblaient être les possibles infinis dans la nature. Cela nous montre que, très souvent, ce qui apparaît comme infini n'est rien d'autre que ce que nous n'avons pas encore compris ou mesuré. C'est sans doute vrai en général. « Infini », au fond, est juste le nom que nous donnons à ce que nous ne connaissons pas encore. La nature semble nous dire, quand nous l'étudions, qu'il n'y a rien, au bout du compte, de vraiment infini.

Un autre infini, depuis toujours, égare nos pensées : l'extension spatiale infinie du cosmos. Cependant, Einstein a trouvé le moyen de penser un cosmos sans bords, mais fini, comme je l'ai relaté au chapitre 3. Les mesures actuelles donnent une échelle de la dimension du cosmos visible d'environ quatorze milliards d'années-lumière. C'est la taille maximale de l'Univers à laquelle nous accédons. Elle est plus

grande que la longueur de Planck d'environ 10^{120} fois, c'est-à-dire 1 suivi de 120 zéros. Entre l'échelle de Planck et l'échelle cosmologique, il y a donc l'immense distance de 120 ordres de grandeur. C'est énorme. Mais fini.

Dans cet espace, entre la taille des minuscules quanta d'espace, des quarks, des protons, des atomes, des structures chimiques, des montagnes, des étoiles, des galaxies formées chacune de cent milliards d'étoiles comme le Soleil, des amas de galaxies, et jusqu'à l'immense Univers visible de cent milliards de galaxies, se déploie la fantastique complexité de notre Univers, dont nous ne connaissons que quelques aspects. Immense. Mais fini.

L'échelle cosmologique se reflète dans la valeur de la constante cosmologique Λ , qui entre dans l'équation de la théorie. La théorie de base contient donc un nombre élevé : le rapport entre l'échelle cosmologique et l'échelle de Planck. Ce nombre ouvre en quelque sorte l'espace à toute la complexité du monde. Mais ce que nous voyons et, pour l'instant, comprenons de l'Univers ne nous noie pas dans l'infini. C'est une mer immense, mais finie.

Un des livres les plus tardifs de la Bible, le Livre de l'Ecclésiaste, s'ouvre sur des paroles puissantes (ici dans la traduction de l'École biblique de Jérusalem) :

Le sable de la mer, les gouttes de pluie, les jours de l'éternité, qui peut les dénombrer ? La hauteur du ciel, l'étendue de la terre, les profondeurs de l'abîme, qui peut les explorer ? [...] Il n'y a qu'un être sage... c'est le Seigneur.

Personne ne peut dénombrer le sable de toutes les plages du monde.

Mais, pas très longtemps après la composition de ce texte, un autre grand texte était écrit, avec un *incipit* qui résonne encore :

Il est des personnes, ô roi Gélon, qui pensent que le nombre des grains de sable est infini.

Il s'agit de l'ouverture de l'*Arénaire* d'Archimède, où le plus grand savant de l'Antiquité... compte les grains de sable.

Il le fait pour montrer que leur nombre est fini et qu'on peut le déterminer. Le système de numération antique ne permettait pas de traiter de grands nombres. Dans l'*Arénaire*, Archimède développe un nouveau système de numération, semblable à nos exponentielles, qui permet de traiter des nombres très grands, et il en démontre la puissance en comptant, le sourire aux lèvres, combien de grains de sable il y a non seulement sur les rivages des mers mais dans tout l'Univers.

Le jeu de l'*Arénaire* est léger, mais profond. En un coup d'ailes des Lumières avant la lettre, Archimède se libère de la forme de savoir qui veut qu'il y ait des mystères intrinsèquement inaccessibles à la pensée humaine. Archimède ne prétend pas connaître avec exactitude les dimensions de l'Univers ou le nombre précis des grains de sable. Ce n'est pas la complétude de son savoir qu'il défend. Au contraire, il est explicite sur la valeur approximative et provisoire des estimations qu'il donne. Il parle, par exemple, de plusieurs alternatives concernant les dimensions de l'Univers, sur lesquelles il n'a pas une opinion définitive. L'important n'est pas une présomption de complétude de son savoir. Au contraire : c'est la conscience que l'ignorance d'hier peut être éclairée aujourd'hui, et que celle d'aujourd'hui pourrait être éclairée demain.

Le fait central est sa révolte contre le renoncement à la connaissance. Une déclaration de foi en la connaissabilité du monde et

une réplique orgueilleuse à ceux qui se contentent de leur ignorance, qui appellent infini ce que nous ne comprenons pas et qui délèguent la sagesse à d'autres.

Des siècles se sont écoulés et le texte de l'Ecclésiaste est présent aujourd'hui, avec le reste de la Bible, dans d'innombrables foyers de la planète, tandis que celui d'Archimède n'est lu que par quelques-uns. Archimède a été massacré dans des circonstances troubles par les Romains, lors du sac de Syracuse, dernier pré carré de la Grande Grèce à tomber sous le joug romain, durant l'expansion de ce futur empire qui bientôt compterait l'Ecclésiaste parmi les textes fondateurs de sa religion d'État. Une position qu'il conserverait plus d'un millénaire. Durant ce millénaire, les calculs d'Archimède resteront obscurs à tous.

Près de Syracuse se trouve l'un des plus beaux lieux d'Italie, le théâtre de Taormina, qui s'ouvre sur la Méditerranée et sur l'Etna. À l'époque d'Archimède, on y jouait Sophocle et Euripide. Les Romains l'ont adapté aux combats de gladiateurs et se divertissaient au spectacle de leur mort.

Le jeu raffiné de l'*Arénaire* n'est peut-être pas seulement la divulgation d'une audacieuse construction mathématique ou de la virtuosité d'une des plus extraordinaires intelligences de l'Antiquité. C'est aussi un cri d'orgueil de la raison, qui connaît sa propre ignorance, mais n'est pas disposée pour autant à déléguer à d'autres la source du savoir. C'est un modeste mais subtil manifeste contre l'infini, et contre l'obscurantisme.

La gravité quantique est une des nombreuses suites de l'*Arénaire*. Nous sommes en train de compter les grains d'espace dont le cosmos est formé. Un cosmos immense, mais fini.

La seule chose vraiment infinie, c'est notre ignorance.

CHAPITRE 12

Information

Nous approchons du terme de notre voyage. Dans les derniers chapitres, j'ai parlé d'applications concrètes de la gravité quantique : la description de ce qui est arrivé à l'Univers aux alentours du Big Bang, la description des propriétés thermiques des trous noirs et la suppression des infinis.

Avant de conclure, j'aimerais en revenir à la théorie, tout en regardant vers l'avenir, en parlant de l'« information » : il s'agit d'un véritable fantôme qui va hanter la physique théorique en suscitant à la fois enthousiasme et confusion.

Ce chapitre diffère des autres : dans les six chapitres précédents, j'ai introduit des idées et des théories non encore éprouvées, mais bien définies ; ici, en revanche, j'évoquerai des idées encore très confuses et qui ont besoin d'organisation. Et donc, cher lecteur, si tu as trouvé le voyage jusqu'ici un peu accidenté, à présent tiens-toi bien, car nous allons traverser de grands trous d'air. Si ce chapitre apparaît particulièrement obscur, ce n'est pas parce que tu as les idées confuses, cher lecteur ; c'est parce que, ces idées confuses, ce sont les miennes.

Nombreux sont les scientifiques qui soupçonnent que le concept d'information peut être fondamental pour accomplir de nouveaux pas

en avant en physique. On parle d'information quand on parle de fondements de la thermodynamique, la science de la chaleur, de fondements de la mécanique quantique et, dans d'autres contextes, parfois aussi de manière très imprécise. Ces idées me semblent receler quelque chose d'important ; je vais essayer d'expliquer pourquoi, et me demander quel rapport l'information peut avoir avec la gravité quantique.

Avant tout, qu'est-ce que l'information ? Le mot est employé dans le langage courant avec une grande diversité de sens, ce qui est aussi une source de confusion dans son usage scientifique. La notion scientifique d'information a été définie par Claude Shannon, mathématicien et ingénieur américain, en 1948, et c'est quelque chose de très simple : l'information est une mesure du nombre d'alternatives possibles pour quelque chose. Par exemple, si je jette un dé, celui-ci peut tomber sur six faces. Si je vois qu'il est tombé sur une face particulière, j'ai une quantité d'information $N = 6$, car il y avait six possibilités. Si je ne sais pas quel jour est ton anniversaire, il y a 365 possibilités différentes. Si tu me dis quel jour est ton anniversaire, j'aurai une information $N = 365$, etc.

Au lieu du nombre d'alternatives N , il est plus commode, pour indiquer l'information, d'utiliser le logarithme en base 2 de N , appelé S . L'information de Shannon est donc $S = \log_2 N$, où N est le nombre d'alternatives. De la sorte, l'unité de mesure, $S = 1$, correspond à $N = 2$ (car $1 = \log_2 2$), c'est-à-dire à l'alternative minimale, qui comprend seulement deux possibilités. Cette unité de mesure est l'information entre seulement deux alternatives et elle est appelée « bit ». Quand je sais qu'à la roulette est sorti un numéro rouge au lieu d'un noir, j'ai un bit d'information ; si je sais que c'est un rouge-pair qui est sorti, j'ai deux bits d'information ; si c'est un rouge-pair-manque, j'ai trois bits d'information. Deux bits d'information correspondent à

quatre alternatives (rouge-pair, rouge-impair, noir-pair, noir-impair). Trois bits d'information correspondent à huit alternatives, et ainsi de suite ¹.

Un point clé est que l'information peut être située quelque part. Imagine, lecteur, que tu as en main une bille qui peut être blanche ou noire. Imagine que j'ai moi aussi une bille qui peut être blanche ou noire. Il y a deux possibilités de mon côté et deux du tien. Le nombre total de possibilités est de 4 (c'est-à-dire 2×2) : blanche-blanche, blanche-noire, noire-blanche et noire-noire. Si les couleurs des deux billes sont indépendantes l'une de l'autre, toutes ces possibilités peuvent être réalisées. Maintenant, supposons autre chose : que, pour une quelconque raison physique, nous soyons certains que les deux billes sont de la même couleur (par exemple, parce que nous les avons reçues en cadeau de la même personne, qui offre *toujours* des billes de la même couleur, ou parce que nous les avons tirées toutes les deux d'un sac de billes toutes de la même couleur). Le nombre total d'alternatives est donc *seulement* de 2 (blanche-blanche ou noire-noire), même si les alternatives restent 2 de ton côté et 2 de mon côté. Dans ce cas, le nombre total d'alternatives (2) est plus petit que le produit (4) du nombre d'alternatives de ton côté (2) par le nombre d'alternatives de mon côté (2). Note que, dans cette situation, il se produit quelque chose de particulier : si tu regardes ta bille, *tu sais de quelle couleur est la mienne*. Dans ce cas, nous disons que les couleurs des deux billes sont « corrélées », liées l'une à l'autre, et que l'information sur la couleur de *ma* bille vaut aussi pour la *tienne*. Ma bille « a de l'information » sur la tienne.

Si vous y réfléchissez, c'est ce qui se passe toujours quand nous communiquons : par exemple, si je te téléphone, je sais que ton téléphone est un objet qui fait en sorte que les sons de ton côté ne soient pas indépendants des sons de mon côté. Les sons des deux côtés

sont liés, comme les couleurs des billes. L'exemple n'est pas choisi au hasard : Shannon, qui a inventé la théorie de l'information, travaillait dans une compagnie de téléphone, et cherchait le moyen de mesurer avec précision ce que pouvait « transporter » une ligne téléphonique. Que transporte donc une ligne téléphonique ? Elle transporte de l'information. Elle transporte une capacité de distinguer entre des alternatives. C'est pourquoi Shannon a défini l'information.

Pourquoi la notion d'information est-elle utile, et peut-être même fondamentale pour comprendre le monde ? Pour une raison futile : elle mesure la possibilité des systèmes physiques de communiquer entre eux.

Revenons une dernière fois aux atomes de Démocrite. Imaginons un monde formé d'une mer immense d'atomes qui rebondissent, s'attirent, s'agglomèrent, et de rien d'autre. Ne manque-t-il pas quelque chose ?

Platon et Aristote ont insisté sur le fait qu'il manquait quelque chose, et ils ont pensé que la *forme* des choses était ce quelque chose *en plus*, outre la *substance* dont les choses sont faites. Pour Platon, ces formes existent en soi, dans un monde absolu, le monde des Idées. L'Idée du cheval existait avant et indépendamment de n'importe quel cheval réel. Pour Platon, un cheval réel n'est qu'un pâle reflet d'un cheval idéal. Les éventuels atomes dont le cheval est fait comptent pour peu ou pour rien : ce qui compte, c'est la « chevalitude », la forme abstraite. Aristote est un peu plus réaliste, mais pour lui non plus, la forme ne se réduit pas à la substance. Dans une statue, il y a plus que la pierre dont elle est faite. Cet « en plus », pour Aristote, c'est la forme. Voilà quelle a été la critique antique adressée au puissant matérialisme démocritéen, et elle reste encore aujourd'hui la critique principale du matérialisme.

Mais la proposition de Démocrite était-elle bien que tout se ramène à des atomes ? Il dit que, lorsque les atomes se combinent, ce qui compte c'est leur forme, leur disposition dans la structure ainsi que la façon dont ils se combinent. Et il donne l'exemple des lettres de l'alphabet, qui ne sont qu'une vingtaine, mais qui « peuvent se combiner de diverses façons, produisant des comédies ou des tragédies, des histoires ridicules ou des poèmes épiques ».

Il y a bien plus que les seuls atomes dans cette idée : il y a quelque chose qui est saisi par la *façon* dont ils se disposent les uns par rapport aux autres. Mais quelle importance peut avoir la façon dont les atomes se disposent, dans un monde où il n'y a que d'autres atomes ?

Si les atomes sont aussi un alphabet, qui peut lire les phrases écrites dans cet alphabet ?

La réponse est subtile : la façon dont les atomes se disposent peut être corrélée à la façon dont d'*autres* atomes se disposent. Et donc, un ensemble d'atomes peut être porteur d'une *information*, au sens technique et précis décrit plus haut, sur un autre système.

Cela, dans le monde physique, se produit sans arrêt et partout, à chaque instant et en chaque lieu : la lumière qui parvient à nos yeux transporte de l'information sur les objets dont elle provient, la couleur de la mer donne une information sur la couleur du ciel au-dessus d'elle, une cellule possède une information sur le virus qui l'a attaquée, un nouvel être vivant est riche d'information car il est corrélé à ses parents et à son espèce, et toi, cher lecteur, en lisant ces lignes, tu reçois une information sur ce que je suis en train de penser tandis que j'écris, c'est-à-dire sur ce qui se produit dans mon cerveau au moment où j'écris ce texte. Ce qui se produit dans les atomes de ton cerveau n'est plus du tout indépendant de ce qui se produit dans ceux de mon cerveau.

Le monde ne se réduit donc pas à un réseau d'atomes qui se rencontrent : il est aussi un réseau de corrélations entre des ensembles d'atomes, un réseau d'information réciproque entre des systèmes physiques.

Dans tout cela, il n'y a rien d'idéaliste ni de spirituel ; ce n'est qu'une application de l'idée de Shannon selon laquelle on peut compter les alternatives. Mais tout cela est une partie du monde comme les pierres des Dolomites, le bourdonnement des abeilles ou les vagues de la mer.

Une fois compris que ce réseau d'informations réciproques existe dans l'Univers, il est naturel d'essayer d'en tirer profit pour décrire le monde. Commençons par un aspect du monde bien compris depuis la fin du XIX^e siècle : la chaleur. Qu'est-ce que la chaleur ? Que signifie le fait qu'une chose est chaude ? Et pourquoi une tasse de thé bouillant refroidit-elle au lieu de se réchauffer ?

C'est le physicien autrichien Ludwig Boltzmann, fondateur de la mécanique quantique, qui l'a compris le premier². La chaleur est le mouvement microscopique et fortuit des molécules : quand le thé est plus chaud, les molécules s'agitent plus vite. Mais pourquoi le thé refroidit-il ? Boltzmann a hasardé une hypothèse splendide : parce que le nombre d'états possibles des molécules qui correspondent au thé chaud et à l'air froid est plus grand que le nombre de ceux qui correspondent au thé froid et à l'air un peu réchauffé. Pour utiliser la notion d'information de Shannon, cette idée se traduit immédiatement en l'affirmation : parce que l'information contenue dans le thé froid et dans l'air plus chaud est inférieure à celle contenue dans le thé chaud et dans l'air plus froid. Et le thé ne peut pas se réchauffer car l'information n'augmente jamais toute seule.

Je m'explique. Comme les molécules du thé sont innombrables et très petites, nous ne connaissons jamais leur mouvement précis : il

nous manque de l'information. Cette information peut se calculer (Boltzmann l'a fait : il a calculé combien d'états différents les molécules du thé chaud peuvent prendre). Si le thé refroidit, un peu de son énergie est transmise à l'air ; les molécules du thé s'agitent donc plus lentement, et les molécules de l'air plus rapidement. Si je calcule l'information manquante, je découvre qu'elle a augmenté. Si le contraire s'était produit, c'est-à-dire si le thé s'était réchauffé en absorbant de la chaleur de l'air plus froid, alors l'information (rappelons-nous : l'information est seulement le nombre d'alternatives possibles, ici le nombre de façons dont les molécules de thé et d'air s'agitent à des températures données) aurait augmenté. Mais l'information ne peut pas tomber du ciel. Elle ne peut pas augmenter toute seule, car ce que nous ne savons pas, nous ne le savons pas, et donc le thé ne peut pas se réchauffer de lui-même au contact d'un air plus froid.

Boltzmann n'a pas été pris très au sérieux. Il s'est suicidé à 56 ans à Duino, près de Trieste. Aujourd'hui, il est considéré comme un des grands génies de la physique. Sur sa tombe est gravée la formule :

$$S = k \log W$$

qui exprime l'information (manquante, S) comme le logarithme ($\log$) du nombre d'alternatives W , c'est-à-dire l'idée clé de Shannon. Boltzmann s'était aperçu que cette quantité S coïncidait exactement avec l'« entropie » utilisée en thermodynamique. L'entropie est l'information manquante, c'est-à-dire l'information avec le signe moins. L'entropie totale ne peut qu'augmenter, à cause du fait que l'information ne peut que diminuer³.

Que l'information puisse être utilisée comme instrument conceptuel pour faire la lumière sur la base de la science de la chaleur est aujourd'hui tout à fait accepté par les physiciens. Plus audacieuse, mais

aujourd'hui défendue par un nombre croissant de théoriciens, est l'idée que le concept d'information peut nous aider à comprendre les aspects encore mystérieux de la mécanique quantique, évoqués au chapitre 5.

N'oubliez pas qu'une des idées clés de la mécanique quantique est précisément le fait que l'information est finie. Le nombre de résultats alternatifs que nous pouvons obtenir en mesurant un système physique⁴ est infini, selon la mécanique classique, mais il est en réalité fini, comme nous l'avons compris avec la mécanique quantique. Et donc, la mécanique quantique peut être regardée en premier lieu comme la découverte que l'information, par nature, est toujours *finie*.

Toute la structure de la mécanique quantique peut être lue et comprise en termes d'information de la façon suivante. Un système physique se manifeste seulement et toujours en interagissant avec un autre. La description d'un système physique est donc toujours faite par rapport à un autre système physique, celui avec lequel le premier interagit. Toute description de l'état d'un système physique est donc toujours une description de l'*information* qu'un système physique a d'un autre système physique, c'est-à-dire de la *corrélation* entre les systèmes. Les mystères de la mécanique quantique deviennent moins épais si nous l'interprétons de cette façon, à savoir comme la description de l'information que les systèmes physiques ont l'un de l'autre.

La description d'un système, au bout du compte, n'est qu'une façon de résumer toutes les interactions passées avec ce système et d'essayer de les organiser de telle manière qu'on puisse prévoir laquelle peut être l'effet d'interactions futures.

À partir de cette idée, toute la structure formelle de la mécanique quantique peut être largement déduite de deux postulats simples⁵ :

1. L'information importante dans tout système physique est finie.

2. On peut toujours obtenir une nouvelle information sur un système physique.

Ici, l'« information importante » est celle que nous avons sur un *système* donné comme conséquence de nos interactions passées avec lui, information qui nous permet de prévoir quel sera l'effet, sur nous, de futures interactions avec ce même système. Le premier postulat caractérise la granularité de la mécanique quantique – le fait qu'il existe un nombre fini de possibilités. Le second caractérise l'indétermination – le fait qu'il y ait toujours quelque chose d'imprévisible qui nous permet d'obtenir une *nouvelle* information. Quand nous acquérons une nouvelle information sur un système, comme l'information importante totale ne peut pas croître indéfiniment (en raison du premier postulat), il suit qu'une partie de l'information précédente doit devenir *négligeable*, c'est-à-dire qu'elle ne doit plus avoir aucun effet sur les prédictions futures. C'est pourquoi, en mécanique quantique, quand nous interagissons avec un système en général, non seulement nous acquérons quelque chose, mais en même temps nous « effaçons » une partie de l'information du système⁶.

De ces deux postulats simples découle dans une grande mesure toute la structure mathématique de la mécanique quantique. Cela signifie que la théorie se prête étonnamment bien à être exprimée en termes d'information.

Le premier à avoir saisi que la notion d'information est fondamentale pour comprendre la réalité quantique a été John Wheeler, le père de la gravité quantique. Wheeler a forgé le slogan « *It from bit* » pour exprimer cette idée. Il n'est pas facile de le traduire ; littéralement, il signifie « Tout vient du bit », où un bit est l'unité minimale d'information, l'alternative minimale entre un oui et un non. « *It* », « cela », signifie ici « toute chose ». Le sens est donc à peu près : « Tout est information. »

L'information réapparaît dans le domaine de la gravité quantique. Vous vous rappelez que l'aire d'une surface quelconque est déterminée par les spins des boucles qui coupent cette surface ? Ces spins sont des quantités discrètes et chacun d'eux contribue à l'aire. Une surface avec une aire fixée peut être formée par ces quanta élémentaires d'aire selon de nombreuses façons différentes, disons un nombre N de façons. Et donc, si je connais l'aire de la surface, mais que je ne sais pas comment sont distribués ses quanta d'aire, j'ai de l'information manquante sur la surface. C'est là précisément une des façons de calculer la chaleur des trous noirs : les quanta d'aire d'un trou noir enfermé dans une surface d'une certaine aire peuvent présenter N différentes distributions possibles, et donc c'est comme une tasse de thé chaud, où les molécules peuvent se déplacer de N différentes façons possibles. Cela signifie qu'on peut associer une quantité d'information manquante, c'est-à-dire d'entropie, à un trou noir.

La quantité d'information ainsi associée à un trou noir dépend directement de l'aire A du trou noir : si le trou est plus grand, l'information manquante est plus importante.

Quand de l'information entre dans un trou noir, elle n'est plus récupérable pour qui reste à l'extérieur. Mais l'information qui entre dans le trou noir emporte toujours avec elle de l'énergie en vertu de laquelle le trou noir devient plus grand et son aire augmente. Vue de l'extérieur, l'information perdue apparaît à présent comme une entropie associée à l'aire du trou noir. Le premier à suspecter cela a été le physicien israélien Jacob Bekenstein.

Mais la situation est rien moins que claire, car, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, les trous noirs émettent une radiation thermique et petit à petit s'évaporent, devenant peu à peu plus petits, probablement jusqu'à disparaître, se confondant en cette mer de trous noirs microscopiques qu'est l'espace à l'échelle de Planck. Où passe

l'information tombée dans le trou noir, alors que ce trou noir s'amenuise ? Les physiciens théoriques se divisent sur la question, et aucun n'a les idées parfaitement claires à ce sujet.

Bekenstein, le physicien qui a eu le premier l'intuition qu'un trou noir devait avoir des propriétés thermiques, a supposé l'existence d'un principe général selon lequel, dans une région quelconque entourée par une surface d'aire A , il est impossible de découvrir un système qui ait une information manquante supérieure à celle d'un trou noir de la même aire. Aujourd'hui, certains physiciens supposent qu'il peut s'agir là d'une loi universelle, qu'ils appellent le « principe holographique ». Ce mot vient des hologrammes, qui sont des surfaces planes contenant des images tridimensionnelles. Le principe holographique dit quelque chose de semblable : il dit que toute l'information que nous pouvons faire sortir d'une région est limitée par l'aire de son bord et, donc, que tout se passe comme si on pouvait la mettre tout entière sur le bord de cette région.

En réalité, personne n'a encore bien compris ce qu'est ce principe holographique, même si beaucoup en parlent. Rappelez-vous qu'en gravité quantique nous décrivons des *processus*, et qu'un processus est une région d'espace-temps. Donc, nous calculons toujours la probabilité de ce qui se produit sur le *bord*, sans jamais décrire exactement ce qui se passe à l'intérieur. Il semble que la réalité veuille être décrite en termes de bords entre des régions ou entre ces systèmes, et qu'elle refuse la description complète de ce qui se passe à l'intérieur.

La physique parle de la relation entre des systèmes et de l'information que les systèmes ont les uns sur les autres, information qu'ils s'échangent au bord entre un processus et un autre. Dans cette situation, on a toujours des corrélations entre des systèmes au-delà du bord et donc, on a toujours une situation « statistique ». Tout cela – je

crois – indique qu'à la base de notre compréhension du monde, outre la relativité générale et la mécanique quantique, il faut inclure également la théorie de la chaleur, c'est-à-dire la mécanique statistique, et la thermodynamique, c'est-à-dire la théorie de l'information. Mais la thermodynamique de la relativité générale, c'est-à-dire la mécanique statistique des quanta d'espace, en est encore à ses premiers balbutiements. Elle est encore très confuse, et il nous reste beaucoup à comprendre.

Tout cela nous conduit à la dernière idée physique que je décris dans ce livre, qui est à la limite de ce que je sais : le temps thermique.

Temps thermique

Le problème à l'origine de l'idée de temps thermique est simple. Au chapitre 7, j'ai montré qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser la notion de temps pour décrire la physique et que, même au niveau fondamental, il vaut mieux oublier complètement cette notion. Le temps ne joue aucun rôle au niveau fondamental. Une fois cela admis, il est plus facile d'écrire les équations de la gravité quantique.

Il y a énormément de notions quotidiennes qui ne jouent plus aucun rôle dans les équations fondamentales de l'Univers ; par exemple, les notions de « haut » et de « bas », ou celles de « chaud » et de « froid » ; rien d'étonnant alors à ce que des notions communes disparaissent dans la théorie fondamentale. Cependant, une fois cette idée admise, un deuxième problème s'ouvre, évidemment : comment récupérer la notion de temps de notre expérience commune ?

Par exemple, « haut » et « bas » n'entrent pas dans les équations fondamentales de la physique, mais nous savons ce qu'elles signifient dans un schéma sans un haut absolu ni un bas absolu. « Bas » indique

simplement la direction vers une grosse masse voisine dont la gravité nous attire, et « haut » la direction opposée. Il en va de même pour « chaud » et « froid » : il n'y a pas de choses « chaudes » ou « froides » au niveau microscopique, mais dès que nous rassemblons un grand nombre de constituants microscopiques et que nous les décrivons en termes de valeurs moyennes, alors apparaît la notion de « chaud » : un corps chaud est un corps dont la valeur moyenne de la vitesse des différents constituants est élevée. Donc, nous sommes en mesure de comprendre le sens de « haut » ou de « chaud » dans des situations opportunes : la présence d'une grosse masse voisine, ou bien le fait que nous avons affaire seulement à des valeurs moyennes de nombreuses molécules.

Quelque chose de semblable doit valoir pour le « temps ». Si la notion de temps ne joue aucun rôle au niveau élémentaire, elle joue assurément un rôle significatif dans notre vie (comme « haut » et « chaud »). Que signifie « Du temps a passé », si le temps ne fait pas partie de la description fondamentale du monde ? Tel est le problème auquel l'idée de *temps thermique* offre une réponse.

Cette réponse est simple : l'origine du temps est semblable à celle de la température. Elle vient du fait que l'on établit des moyennes sur de multiples variables microscopiques. Essayons de comprendre.

Qu'il y ait un lien profond entre temps et température est une idée ancienne et récurrente, même si personne n'a jamais bien compris à fond quel est exactement ce lien. Si nous y réfléchissons bien, tous les phénomènes que nous lions à l'écoulement du temps impliquent la température.

Essayons de le dire de façon plus précise. La caractéristique la plus saillante du temps est qu'il va de l'avant, non en arrière ; c'est son irréversibilité. C'est l'irréversibilité qui caractérise ce que nous appelons le temps. Les phénomènes « mécaniques », c'est-à-dire les phénomènes

où n'entre pas la chaleur, sont toujours réversibles. Si vous les filmez et que vous passez le film à l'envers, vous verrez des phénomènes parfaitement réalistes. Par exemple, si vous filmez un pendule, ou un caillou jeté en l'air, qui monte puis redescend, et que vous regardez le film à l'envers, vous verrez encore un pendule très raisonnable, ou un caillou tout autant raisonnable, qui monte avant de redescendre. Ah, direz-vous, mais ce n'est pas vrai ! Quand le caillou arrive par terre, il s'arrête, si je regarde un film à l'envers, je vois un caillou qui saute tout seul à partir de la terre, et cela est impossible. Très juste. Et, en effet, quand le caillou arrive par terre, il s'arrête, mais où va son énergie ? Elle va *chauffer* la terre là où il est tombé ! Elle se transforme en un peu de *chaleur*. Au moment précis où se produit de la chaleur, il se passe un phénomène irréversible : un phénomène qui distingue clairement le film normal du film inversé, le passé du futur. C'est toujours la chaleur, en dernière analyse, qui distingue le passé du futur.

C'est universel : une chandelle brûle et se transforme en fumée, mais la fumée ne se transforme pas en chandelle. Une tasse de thé bouillant refroidit et ne se réchauffe pas : elle diffuse de la chaleur. Nous vivons et nous vieillissons : nous produisons de la chaleur. Notre bicyclette vieillit avec le temps et s'use : elle produit de la chaleur dans les frottements. Pensez au Système solaire : de prime abord, il continue à tourner comme un immense mécanisme toujours égal à lui-même. Il ne produit pas de chaleur et, en effet, si nous le regardions tourner à l'envers, nous ne verrions rien de bizarre. Mais, à mieux y regarder, il n'en va pas ainsi ; le Soleil consume son hydrogène et, un jour, il l'aura épuisé et s'éteindra : le Soleil vieillit lui aussi et, de fait, il produit de la chaleur. Mais ce n'est pas tout : la Lune elle aussi paraît tourner toujours identique à elle-même autour de la Terre, mais en réalité elle s'en éloigne lentement, car les marées réchauffent un peu la mer

(chaleur), qui absorbe un peu d'énergie. Toutes les fois que se produit un phénomène qui garantit l'écoulement du temps, il y a production de chaleur. Et la chaleur, c'est faire des moyennes sur de nombreuses variables.

L'idée du temps thermique est de renverser cette observation : au lieu d'essayer de comprendre pourquoi le temps produit une dissipation de chaleur, demandons-nous pourquoi la dissipation de la chaleur produit le temps.

Grâce au génie de Boltzmann, nous savons que la notion de chaleur vient du fait que nous avons seulement affaire à des quantités moyennes de nombreuses variables. L'idée de temps thermique est que la notion de temps vient elle aussi du fait que nous avons seulement affaire à des quantités moyennes de nombreuses variables⁷.

Tant que nous nous limitons à une description complète du système, toutes les variables du système sont égales et aucune ne représente le temps. Mais dès que nous décrivons le système à l'aide de quantités moyennes sur de nombreuses variables, aussitôt les choses s'organisent de façon que ces quantités moyennes se comportent comme si un temps existait. Un temps au cours duquel la chaleur se dissipe. Le temps de notre expérience quotidienne.

Le temps n'est donc pas un constituant fondamental du monde, mais il est quand même partout, car le monde est immense et nous sommes de petits systèmes qui interagissent seulement avec des variables macroscopiques qui reposent toujours sur d'innombrables petites variables microscopiques. Dans notre vie quotidienne, nous ne regardons jamais les diverses particules élémentaires, les divers quanta d'espace. Nous regardons les cailloux, les couchers de soleil, les sourires de nos amis, et chacune de ces choses que nous voyons est un ensemble de myriades de composantes élémentaires. Nous sommes toujours corrélés avec des moyennes. Et les moyennes se comportent

toujours comme des moyennes : elles dégagent de la chaleur et, intrinsèquement, elles génèrent du temps.

La difficulté de saisir cette idée vient du fait qu'il est très difficile de penser à un monde sans temps et à une formation du temps de façon approximative. Nous sommes trop habitués à penser à la réalité comme n'existant que dans le temps. Nous sommes des êtres qui vivent dans le temps : nous habitons le temps, nous nous nourrissons de temps. Nous sommes un effet de cette temporalité, produite par les valeurs moyennes de variables microscopiques. Mais les difficultés de notre intuition ne doivent pas nous détourner de notre chemin. Comprendre mieux le monde veut souvent dire aller contre notre propre intuition. Si ce n'était pas le cas, il aurait été plus facile de le comprendre.

Le temps n'est qu'un effet de notre négligence à l'égard des micro-états physiques des choses. Le temps est l'information que nous n'avons pas. Le temps est notre ignorance.

Réalité et information

Pourquoi la notion d'information joue-t-elle un rôle aussi central ? Peut-être parce qu'il ne faut pas confondre ce que nous savons d'un système avec l'état absolu de ce même système. Plus précisément, parce que ce que nous savons est toujours quelque chose qui concerne la relation entre nous et le système. Tout savoir est intrinsèquement une relation ; et donc, il dépend à la fois de son objet et de son sujet. Il n'existe pas d'états d'un système qui ne soient pas, explicitement ou implicitement, liés à un autre système physique. La mécanique classique a cru pouvoir ignorer cette vérité simple et parvenir à donner, au moins en théorie, une vision de la réalité indépendante de qui la

regarde. Mais le développement de la physique a montré que, au bout du compte, c'est impossible.

Attention : lorsque nous disons que « nous avons de l'information », par exemple sur la température d'une tasse de thé, et que « nous n'avons pas d'information » sur la vitesse des diverses molécules, nous n'évoquons pas quelque chose qui devrait être compris en termes d'états mentaux ou d'idées abstraites. Nous disons seulement que les lois de la physique ont fait qu'il existe une corrélation entre nous et la température (par exemple, nous avons regardé un thermomètre), mais pas entre nous et les vitesses individuelles des molécules. Nous le disons exactement dans le même sens que nous disons que la bille blanche dans tes mains « a de l'information » sur le fait que la bille dans mes mains est blanche elle aussi. Il s'agit de faits physiques, non de notions mentales. Une bille peut avoir de l'information même si elle ne pense pas, de même que la clé USB d'un ordinateur contient de l'information même si elle ne pense pas (le nombre de gigabytes gravé sur une clé USB indique la quantité d'information qu'elle peut contenir). Cette information, ces corrélations entre états de systèmes sont partout dans l'Univers.

Je pense que, pour comprendre la réalité, il est nécessaire d'avoir à l'esprit que ce à quoi nous nous référons, quand nous parlons de la réalité, est étroitement lié à ce réseau de relations, d'information réciproque, qui tisse le monde. Au fond, c'est toujours de ce réseau que nous parlons.

Par exemple, nous morcelons la réalité qui nous entoure en objets. Mais la réalité n'est pas faite d'objets. C'est un flux continu et continuellement variable. Dans cette variabilité, nous établissons des frontières qui nous permettent de parler de la réalité. Songez à une vague dans la mer. Où une vague finit-elle ? Où commence-t-elle ? Qui peut le dire ? Et pourtant, les vagues sont réelles. Songez aux

montagnes. Où une montagne commence-t-elle ? Où finit-elle ? Jusqu'où se poursuit-elle sous terre ? Ce sont des questions dénuées de sens, car une vague ou une montagne ne sont pas des objets en soi, ce sont des habitudes que nous avons de découper le monde pour pouvoir en parler plus facilement. Leurs frontières sont arbitraires, conventionnelles, commodes. Ce sont des façons d'organiser l'information dont nous disposons ou, mieux, des formes de l'information dont nous disposons.

Il en va de même pour tous les objets, si nous y réfléchissons bien, et même pour un système vivant. C'est pourquoi cela n'a guère de sens de se demander si un ongle à moitié coupé est encore moi ou déjà non-moi, si les poils que mon chat perd sur mon divan sont encore une partie du chat ou pas, ou bien quand exactement un enfant commence à vivre. Un enfant commence à vivre le jour où un homme et une femme pensent à lui pour la première fois, ou bien quand en lui se forme la première image de lui-même, ou bien quand il respire pour la première fois, ou quand il reconnaît son prénom, ou quand on lui applique n'importe quelle autre convention : elles sont toutes entièrement arbitraires. Ce sont des façons de penser et de s'orienter dans la complexité.

La notion de « système physique », cette notion abstraite sur laquelle vit une bonne partie de la physique, n'est évidemment elle aussi qu'une idéalisation, une façon d'organiser notre information fluctuante sur le réel.

Un système vivant est un système particulier qui se reforme sans cesse, semblable à lui-même et interagissant sans arrêt avec le monde extérieur. De ces systèmes ne subsistent que les plus efficaces à le faire, et donc, dans les systèmes existants se manifestent les propriétés qui les ont fait subsister, lesquelles se caractérisent comme celles qui rendent leur subsistance possible. C'est pour cela que les systèmes

vivants sont interprétables, et pourquoi nous les interprétons en termes d'intentionnalité, de finalité.

La finalité dans le monde biologique – c'est là l'immense découverte de Darwin – est l'expression ou, c'est la même chose, le nom que nous donnons au résultat de la sélection de formes complexes capables de subsister. Mais la façon la plus efficace pour subsister dans un milieu est de bien gérer les corrélations avec le monde extérieur, c'est-à-dire l'information sur lui, et de savoir recueillir, emmagasiner, transmettre et élaborer de l'information. Pour cela, il existe des codes d'ADN, des systèmes immunitaires, des organes sensoriels, des systèmes nerveux, des cerveaux complexes, des langages, des livres, la bibliothèque d'Alexandrie, des ordinateurs et Wikipédia. Tout cela permet de maximaliser l'efficacité de la gestion de l'information, c'est-à-dire de la gestion des corrélations.

La statue qu'Aristote voit dans un bloc de marbre existe ; elle est réelle et c'est quelque chose en plus du bloc de marbre, mais qui ne s'épuise pas dans la statue même : c'est quelque chose qui réside dans l'interaction entre le cerveau d'Aristote, ou le nôtre, et le marbre. C'est quelque chose qui concerne l'information que le marbre a en rapport avec quelque chose d'autre et qui est significatif pour Aristote et pour nous. C'est quelque chose de très complexe qui concerne un discobole, Phidias, Aristote et le marbre, et qui réside dans la disposition corrélée des atomes de la statue et dans les corrélations entre ceux-ci et mille autres dans notre tête et celle d'Aristote. Ils nous parlent du discobole comme la bille blanche dans ta main peut te dire que la mienne aussi est blanche. Nous sommes des structures qui se sont sélectionnées pour gérer au mieux (au mieux afin de subsister) de l'information.

Ce n'est là qu'un très bref aperçu, mais il est clair que la notion d'information joue un rôle considérable dans les tentatives actuelles pour comprendre le monde. De la structure des systèmes de

communication aux bases génétiques de la biologie, de la thermodynamique à la mécanique quantique, et jusqu'à la gravité quantique, la notion d'information semble gagner de plus en plus de terrain comme moyen de comprendre. Le monde ne doit peut-être pas être pensé comme un ensemble amorphe d'atomes, mais comme un jeu de miroirs fondé sur les corrélations entre les structures formées par les combinaisons de ces atomes.

Comme le disait Démocrite : non seulement quels atomes sont là, mais aussi dans quel ordre ils sont disposés. Les atomes sont comme les lettres d'un alphabet : un alphabet extraordinaire, tellement riche qu'il permet de se lire, de se réfléchir et même de se penser lui-même. Nous ne sommes pas des atomes : nous sommes des ordres en lesquels les atomes se disposent, capables de refléter d'autres atomes et de nous refléter nous-mêmes.

Démocrite donne une étrange définition de l'homme : « L'homme est ce que nous connaissons tous⁸. » Elle semble idiote et creuse, et elle a été critiquée pour cela, mais elle ne l'est pas. Salomon Luria, le plus grand spécialiste de Démocrite, observe que ce n'est pas une banalité. La nature d'un homme n'est pas définie par sa conformation physique interne, mais par le réseau d'interactions personnelles, familiales et sociales dans lequel il s'inscrit. Ce sont elles qui nous « font », elles qui nous préservent. En tant qu'hommes, nous sommes ce que les autres connaissent de nous, et ce que nous connaissons – de nous-mêmes d'une part, et de ce que les autres connaissent de nous, d'autre part. Nous sommes des nœuds complexes dans un réseau très riche d'informations réciproques.

Tout cela n'est pas une théorie. Ce sont des traces, sur lesquelles nous évoluons – je crois – pour tenter de comprendre un peu mieux notre monde intérieur. Il nous reste beaucoup à comprendre : c'est ce qu'aborde le chapitre suivant, le dernier.

-
1. Un point subtil : l'information ne mesure pas ce que je sais, mais le nombre d'alternatives possibles. L'information qui me dit qu'est sorti le numéro 3 à la roulette est $N = 37$, car il y a 37 numéros ; mais l'information qui me dit que, parmi les numéros rouges, est sorti le numéro 3 est $N = 18$, car il y a 18 numéros rouges. Quelle information ai-je si je sais lequel des frères Karamazov a tué son père ? La réponse dépend du nombre de frères Karamazov.
 2. Boltzmann n'a pas utilisé le concept d'information, mais son travail peut être lu en ce sens.
 3. L'entropie est proportionnelle au logarithme du volume de l'espace des phases. La constante de proportionnalité, k , est la constante de Boltzmann, qui transforme l'unité de mesure de l'information, le *bit*, en unité de mesure de l'entropie, le *joule/kelvin*.
 4. Dans une région finie de son espace des phases.
 5. On trouvera une discussion détaillée de ces deux postulats dans C. Rovelli, « Relational quantum mechanics », art. cit.
 6. Il s'agit de ce qu'on appelle, improprement, la « réduction du paquet d'onde ».
 7. Un état statistique de Boltzmann est décrit par une fonction sur l'espace des phases qui est l'exponentielle du hamiltonien. Le hamiltonien est le générateur de l'évolution temporelle. Dans un système où le temps n'est pas défini, il n'existe pas de hamiltonien. Mais si nous avons un état statistique, il suffit d'en prendre le logarithme, ce qui définit un hamiltonien, et donc une notion de temps.
 8. Cicéron, *Academica priora*, II, 23, 73.

CHAPITRE 13

Le mystère

« La vérité est au fond de l'abîme. »

DÉMOCRITE¹ .

J'ai raconté ce qu'est selon moi la nature des choses à la lumière de ce que nous avons appris. J'ai retracé rapidement le développement de certaines idées clés de la physique fondamentale, illustré les grandes découvertes de la physique du xx^e siècle et décrit l'image du monde en train d'apparaître dans les recherches orientées vers la gravité quantique.

Sommes-nous sûrs de tout cela ? Non.

Une des toutes premières et des plus belles pages de l'histoire des sciences est le passage du *Phédon* de Platon dans lequel Socrate explique la forme de la Terre. Socrate dit qu'il « croit » que la Terre est une sphère, avec de grandes vallées où vivent les hommes. C'est assez juste, malgré quelques confusions. Puis il ajoute : « Je n'en suis pas sûr. » Cette page vaut bien plus que toutes ses inepties sur l'immortalité de l'âme qui emplissent le reste du dialogue. Non seulement c'est le plus ancien texte parvenu jusqu'à nous qui parle

explicitement du fait que la Terre pourrait être ronde, mais, surtout, il brille par la clarté limpide avec laquelle Platon reconnaît les *limites* du savoir de son temps. « Je n'en suis pas sûr », dit Socrate.

Cette conscience aiguë de notre ignorance est au cœur de la pensée scientifique. C'est grâce à cette conscience des limites de notre savoir que nous en avons appris autant sur le monde. Aujourd'hui, nous ne sommes pas sûrs de ce que nous soupçonnons, comme Socrate ne l'était pas de la sphéricité de la Terre, mais nous sommes en train d'explorer ce qui se trouve au bord de notre savoir.

La conscience des limites de notre connaissance est conscience aussi du fait que ce que nous savons, ou croyons savoir, peut aussi se révéler imprécis ou erroné. Ce n'est que parce que nous avons conscience que nos croyances pourraient être erronées que nous pouvons nous en libérer et apprendre davantage. Pour cela, il nous faut avoir le courage d'accepter que ce que nous croyons savoir, y compris nos convictions les plus profondes, puisse être erroné, trop naïf, un peu stupide. Des ombres projetées sur la paroi de la caverne de Platon.

La science naît de cette attitude d'humilité : ne pas se fier aveuglément à ses intuitions. Ne pas se fier à ce que tout le monde dit. Ne pas se fier à la connaissance accumulée par nos pères et par nos aïeux. Nous n'apprenons rien si nous croyons déjà savoir l'essentiel, si nous croyons que l'essentiel a déjà été écrit dans un livre ou préservé par les anciens de la tribu. Les siècles durant lesquels les hommes ont eu foi en ce qu'ils croyaient sont des siècles où tout est resté figé et où personne n'a rien appris de nouveau. S'ils avaient eu une confiance aveugle dans le savoir de leurs pères, Einstein, Newton et Copernic n'auraient pas tout remis en question et n'auraient pas permis à notre savoir de progresser. Si personne n'avait jamais émis de doutes, nous continuerions à adorer des pharaons et à croire que la Terre est posée sur une grande tortue. Même le savoir le plus efficace, comme celui

élaboré par Newton, peut se révéler finalement naïf, comme Einstein l'a montré.

Parfois, on reproche à la science de prétendre tout expliquer, de savoir répondre à toutes les questions. Ce reproche est curieux, pour un scientifique. En réalité, c'est tout le contraire, comme le sait n'importe quel chercheur dans n'importe quel laboratoire du monde : faire de la science signifie se confronter quotidiennement à ses propres limites, aux innombrables choses qu'on ignore et qu'on ne parvient pas à faire. On est loin de cette prétention de tout expliquer ! Nous ne savons pas quelles particules nous trouverons l'année prochaine au Cern, ce que verront nos futurs télescopes, quelles équations décrivent vraiment le monde ; nous ne savons pas résoudre les équations dont nous disposons et nous ne savons parfois pas davantage comprendre ce qu'elles signifient ; nous ne savons pas si la belle théorie sur laquelle nous travaillons est juste, nous ne savons pas ce qu'il y a eu avant le Big Bang, nous ne savons pas comment fonctionnent un orage, une bactérie, un œil, les cellules de notre corps, notre pensée même. Un scientifique, c'est quelqu'un qui vit au bord du savoir, très conscient de ses propres limites et des limites de la connaissance.

Si nous ne sommes sûrs de rien, comment pouvons-nous nous fier à ce que nous dit la science ? La réponse est simple : la science n'est pas fiable parce qu'elle nous donne des réponses certaines, mais parce qu'elle nous fournit les meilleures réponses disponibles au moment présent, les meilleures réponses trouvées jusque-là. La science reflète le meilleur du savoir actuel sur les problèmes qu'elle affronte. C'est précisément son ouverture à l'apprentissage et à la remise en question du savoir qui nous garantit que les réponses qu'elle offre sont les meilleures disponibles : si l'on en trouve de meilleures, ces nouvelles réponses deviennent la science. Lorsque Einstein, en trouvant de meilleures réponses, a montré que Newton se trompait, il n'a pas remis

en cause la capacité de la science à donner les meilleures réponses possibles : au contraire, il n'a fait que confirmer cette capacité.

Les réponses de la science, par conséquent, ne sont pas fiables parce qu'elles sont définitives. Elles sont fiables parce que ce sont les meilleures réponses disponibles pour le moment. Et ce sont les meilleures que nous ayons précisément parce que nous ne les considérons pas comme définitives, raison pour laquelle nous sommes toujours disposés à les améliorer. C'est la conscience de notre ignorance qui donne à la science son extraordinaire fiabilité.

Or c'est de fiabilité que nous avons besoin, pas de certitudes. Car nous n'avons pas de vraies certitudes, et nous n'en aurons jamais, à moins d'accepter de croire les yeux fermés à n'importe quoi. Les réponses les plus fiables sont les réponses scientifiques, car la science est la recherche des réponses les plus fiables, non des réponses certaines.

L'aventure de la science, même si elle plonge ses racines dans le savoir précédent, a son âme dans le changement. L'histoire que j'ai racontée est une histoire dont les racines remontent à des milliers d'années et on a tiré profit de chaque pensée, mais en même temps on n'a jamais hésité à en rejeter une partie, quand on en trouvait une plus efficace. La nature de la pensée scientifique est critique, rebelle, elle ne tolère pas les concessions *a priori*, les révérences, les vérités intouchables. La recherche de la connaissance ne se nourrit pas de certitude, mais d'un manque radical de certitudes.

Cela signifie qu'elle n'accorde pas son crédit à qui prétend détenir la vérité. C'est pourquoi la science et la religion se trouvent souvent opposées. Non parce que la science prétendrait connaître des réponses ultimes mais, à l'inverse, parce que ceux qui prétendent connaître des réponses ultimes et détenir un accès privilégié à la Vérité sont ridicules pour un esprit scientifique.

Accepter l'incertitude substantielle de notre savoir signifie accepter de vivre plongés dans l'ignorance et donc dans le mystère, de vivre avec des questions auxquelles nous ne savons pas (ou peut-être nous ne savons pas encore, ou, qui sait, nous ne saurons jamais) répondre.

Vivre dans l'incertitude est difficile. Certains préfèrent n'importe quelle certitude, même si elle est clairement infondée, à l'incertitude née de la conscience de ses propres limites. D'autres préfèrent croire à une histoire, quelle qu'elle soit, juste parce qu'y croyaient les anciens de la tribu – peu importe qu'elle soit vraie ou fausse –, plutôt qu'accepter le courage de la sincérité : accepter que nous vivions sans savoir tout ce que nous aimerions savoir.

L'ignorance peut faire peur. Par peur, nous pouvons nous raconter une histoire qui nous rassure, quelque chose qui calme notre inquiétude. Au-delà des étoiles existe un jardin enchanté, avec un doux père qui nous accueillera dans ses bras. Peut importe si c'est vrai ; nous pouvons décider d'avoir foi en cette rassurante histoire, mais elle nous ôte l'envie d'apprendre.

Il y a toujours, dans le monde, quelqu'un qui prétend nous apporter des réponses ultimes. Le monde est plein de gens qui prétendent détenir la Vérité. Car ils l'ont apprise de leurs pères, ou lue dans un Grand Livre, ou reçue directement d'un dieu. Il y a toujours quelqu'un, ou quelque institution, qui s'autoproclame dépositaire de la Vérité et qui s'empresse d'offrir à tout le monde des réponses consolatrices aux questions inquiétantes. « N'ayez pas peur, là-haut il y a quelqu'un qui vous aime. » Il y a toujours quelqu'un qui a la présomption d'être le dépositaire de la Vérité, en fermant les yeux sur le fait que le monde est plein d'autres dépositaires de la Vérité, chacun avec sa propre Vérité, différente de celle des autres. Il y a toujours un type vêtu de blanc qui dit : « Écoutez-moi, je suis infallible. »

Je ne critique pas ceux qui préfèrent croire aux fables : chacun est libre de croire à ce qu'il veut et de faire ce qu'il veut de son intelligence. Ceux qui ont peur de poser des questions peuvent suivre Augustin qui, un peu par plaisanterie, évoque une réponse qu'il a entendue à la question sur ce que faisait Dieu avant de créer le monde : « *Alta... scrutantibus gehennas parabat*² », « Il préparait des supplices à ceux qui scrutent ces profonds mystères ». Cette même « profondeur » de l'abîme où Démocrite, dans la citation qui ouvre ce chapitre, nous dit qu'il va chercher la vérité.

Pour ma part, je préfère regarder notre ignorance en face, l'accepter et tenter de regarder au-delà, d'essayer de comprendre ce que nous parvenons à comprendre. Non seulement parce que accepter cette ignorance est la meilleure façon de ne pas rester empêtré dans les superstitions et les préjugés, mais avant tout parce que accepter notre ignorance me semble être la voie la plus vraie, la plus belle et, surtout, la plus honnête.

Tenter de voir plus loin, d'aller plus loin, me semble une des choses splendides qui donnent du sens à la vie. Comme aimer et comme contempler le ciel. La curiosité d'apprendre, de découvrir, de vouloir regarder au-delà de la colline, de vouloir goûter la pomme est ce qui nous rend humains. Comme le rappelle à ses compagnons l'Ulysse de Dante (*L'Enfer*, chant XXVI, v. 119-120), nous ne sommes pas faits « pour vivre comme des bêtes, mais pour suivre vertu et connaissance ».

Le monde est plus extraordinaire et profond que n'importe laquelle des fables que nous racontent nos pères. Nous voulons aller le voir. Accepter l'incertitude ne nous enlève pas le goût du mystère, bien au contraire. Nous sommes plongés dans le mystère et dans la beauté du monde. Le monde dévoilé par la gravité quantique est un monde

nouveau, étrange, encore plein de mystère, mais cohérent dans sa beauté simple et limpide.

C'est un monde qui n'existe pas dans l'espace et qui n'évolue pas dans le temps. Un monde fait seulement de champs quantiques en interaction, dont le pullulement de quanta engendre, à travers un réseau dense d'interactions réciproques, espace, temps, particules, ondes et lumière ([figure 13.1](#)).

Et persiste
persiste à pulluler la mort – la vie –
tendre et hostile, claire et inconnaissable.

Et le poète poursuit :

Voilà ce que l'œil saisit de cette tour de guet³.

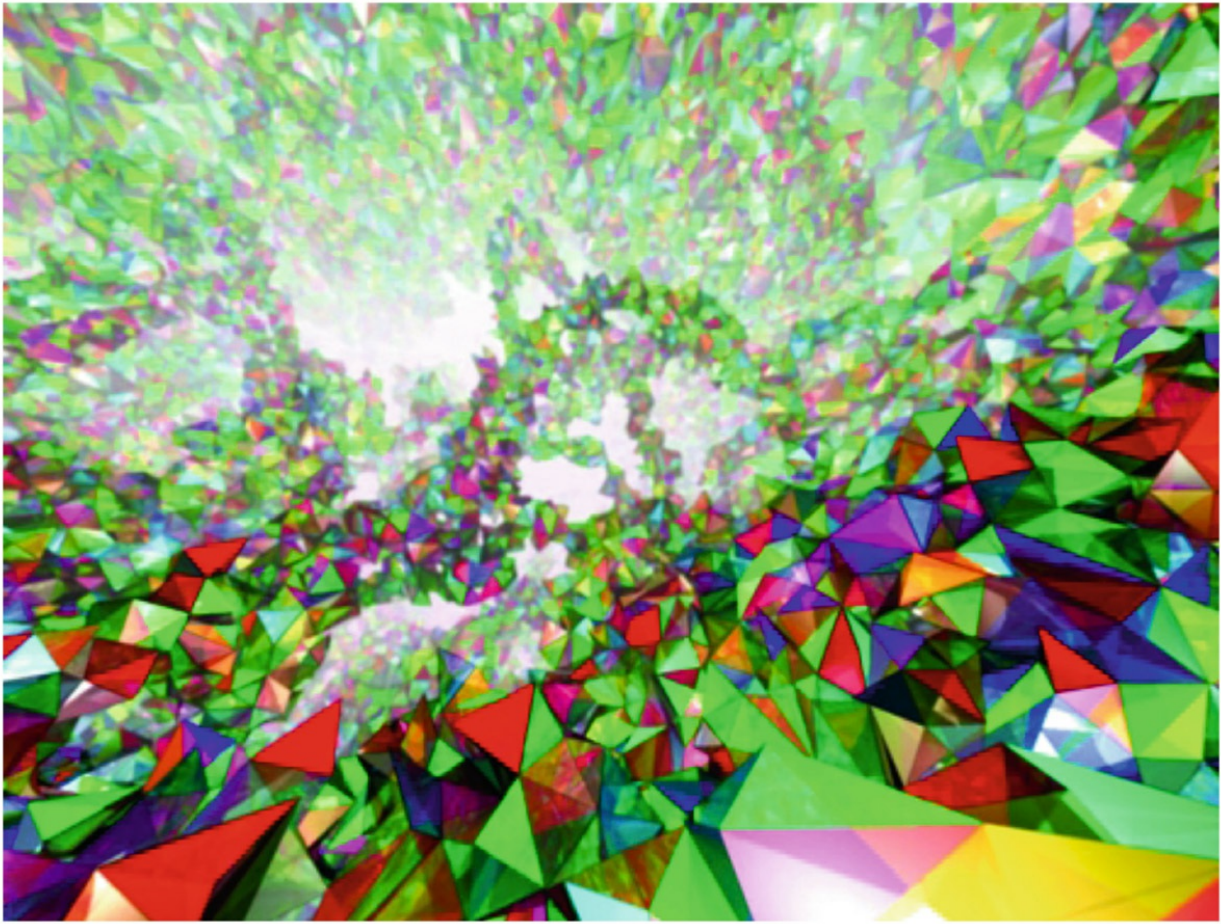


Figure 13.1. Une représentation intuitive des atomes d'espace de la gravité quantique.

Un monde sans infinis, où l'infiniment petit n'existe pas, car une échelle minimale, au-dessous de laquelle il n'y a rien, s'y oppose. Des quanta d'espace se confondent dans la mousse de l'espace-temps et de la structure des choses naît de l'information réciproque que tissent les corrélations entre les régions du monde. Un monde que nous savons décrire par un ensemble d'équations... qu'il faudra sans doute corriger.

C'est un vaste monde qui reste à dévoiler et à explorer. Mon plus beau rêve, c'est que quelqu'un, parmi les plus jeunes lecteurs de ce

livre, puisse aller y naviguer, l'éclairer, le découvrir. Derrière la colline, il y a d'autres mondes encore plus vastes, encore inexplorés.

1. Cité par Diogène Laërce, *Vies, doctrines et sentences des philosophes illustres*, Flammarion, « Garnier-Flammarion », 1993.

2. Augustin d'Hippone, *Confessiones* (tr. fr. *Les Confessions*, Flammarion, « Garnier-Flammarion », 1964, XI, 12, p. 262).

3. M. Luzi, « Dalla torre », in *Dal fondo delle campagne*, Einaudi, 1965, p. 214 (tr. fr. *L'Incessante Origine*, Flammarion, 1985, p. 107).

Bibliographie commentée

- ALFIERI, V. E., *Lucrezio*, Le Monnier, 1929. Une lecture romantique du poème de Lucrèce et de la personnalité de l'auteur. La reconstitution de cette dernière est fascinante, quoique peu crédible, mais d'une splendide sensibilité poétique. La lecture presque opposée de Lucrèce par Odifreddi est intéressante (cf. *infra*).
- ANDOLFO, M. (éd.), *Atomisti antichi. Frammenti e testimonianze*, Rusconi, 1999. Recueil assez complet pour se faire une bonne idée de ce qui nous reste sur l'atomisme antique. L'introduction souligne de manière intéressante l'importance de la métaphore linguistique.
- ARISTOTE, *De la génération et de la corruption*, tr. fr., Vrin, 2006. Le principal ouvrage d'Aristote d'où tirer des informations sur la pensée de Démocrite.
- BAGGOTT, J., *The Quantum Story : A History in 40 Moments*, Oxford University Press, 2011. Une belle et complète reconstitution des principales étapes du développement de la mécanique quantique jusqu'à nos jours.
- BITBOL, M., *Physical Relations or Functional Relations ? A Non-metaphysical Construal of Rovelli's Relational Quantum Mechanics*, Philosophy of Science Archives, 2007, <http://philsci->

- archive.pitt.edu/3506/. Un commentaire et une interprétation dans un sens kantien de la mécanique quantique relationnelle.
- BOJOWALD, M., *L'Univers en rebond. Avant le Big Bang*, tr. fr., Albin Michel, 2011. Une description pour le grand public de l'application de la gravité quantique à boucles à l'Univers. L'auteur en a été l'un des initiateurs. Il illustre le « rebond de l'Univers » qui a pu survenir avant le Big Bang.
- CALAPRICE, A., *Dear Professor Einstein. Albert Einstein's Letters to and from Children*, Prometheus Books, 2002. Un charmant recueil d'échanges épistolaires entre Einstein et des enfants.
- DÉMOCRITE, *Raccolte dei frammenti*, interprétation et commentaire de S. Luria, tr. it., Bompiani, 2007. Un recueil complet de fragments et de témoignages sur Démocrite. Une curieuse introduction dans laquelle Giovanni Reale s'épuise à endiguer le matérialisme de Démocrite, jusqu'à essayer de l'imputer à la censure soviétique !
- DIELS, H., KRANZ, W. (dir.), *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Weidmann, 1903 (la collection de référence, avec traduction allemande des fragments), tr. fr. J.-P. Dumont, *Les Présocratiques*, Gallimard, 1988, version abrégée dans J.-P. Dumont, *Les Écoles présocratiques*, Gallimard, 1991.
- DORATO, M., « Rovelli's relational quantum mechanics, monism and quantum becoming », *Philosophy of Science Archives*, 2013, <http://philsci-archive.pitt.edu/9964/>. Discussion du philosophe italien sur l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique.
- DORATO, M., *Che cos'è il tempo ? Einstein, Gödel e l'esperienza comune*, Carocci, 2013. Une discussion précise et complète, centrée sur la relativité restreinte, de la modification einsteinienne du concept de temps.
- FANO, V., *I paradossi di Zenone*, tr. it., Carocci, 2012. Un beau livre, qui met en relief l'actualité des problèmes suscités par les paradoxes de

Zénon.

FARMELO, G., *L'uomo più strano del mondo. La vita segreta di Paul Dirac, il genio dei quanti*, tr. it., Raffaello Cortina, 2013. Grande biographie, très lisible, du plus grand physicien après Einstein, au caractère déconcertant.

FEYNMANN, R., *Le Cours de physique de Feynman*, Dunod, 1999, 2013. Manuel de physique de base tiré des cours du plus grand physicien américain. Brillant, original, vivant, fort intelligent. Aucun étudiant en physique que la science intéresse ne saurait omettre de le lire et de l'emporter partout avec lui.

FÖLSING, A., *Albert Einstein : A Biography*, Penguin, 1998. Une biographie d'Einstein étendue et complète.

GORELIK, G., FRENKEL, V., *Matvei Petrovich Bronstein and Soviet Theoretical Physics in the Thirties*, Birkhauser Verlag, 1994. Une étude historique sur Bronstein, le jeune Russe, exécuté par la police de Staline, qui a lancé la recherche sur la gravité quantique.

GREENBLATTS, S., *The Swerve : How the World Became Modern*, W. W. Norton, 2011, tr. fr., Quattrocento, Flammarion, 2013. Un livre qui reconstitue l'influence de la redécouverte du poème de Lucrèce sur la naissance du monde moderne.

HEISENBERG, W., *Physique et philosophie*, tr. fr., Albin Michel, 2000. Le véritable inventeur de la mécanique quantique réfléchit sur des problèmes généraux de philosophie des sciences.

KUMAR, M., *Quantum. Einstein, Bohr and the Great Debate about the Nature of Reality*, W. W. Norton, 2008. Une splendide reconstitution pour le grand public de la naissance de la mécanique quantique, et surtout du long dialogue entre Bohr et Einstein sur le sens de la nouvelle théorie.

LAUDISA, F., ROVELLI, C., « Relational quantum mechanics », *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2008.

LUCRÈCE, *De la nature*, tr. fr. et texte latin, Garnier-Flammarion, 1997.

Le principal texte qui nous rapporte les idées et l'esprit de l'atomisme antique.

MARTINI, S., *Democrito : filosofo della natura o filosofo dell'uomo ?*, Armando, 2002. Un ouvrage scolaire qui met en lumière le double visage de Démocrite : scientifique de la nature et humaniste.

NEWTON, I., *Il sistema del mondo*, tr. it., Boringhieri, 1969. Un livre peu connu de Newton, dans lequel il illustre sa théorie de la gravitation universelle de façon bien moins technique que dans son grand traité (les *Principia*).

ODIFREDDI, P., *Come stanno le cose. Il mio Lucrezio, la mia Venere*, Rizzoli, 2013. Belle traduction, amplement commentée, du poème de Lucrèce, qui en souligne l'aspect scientifique et moderne. Voir aussi la lecture de Lucrèce par Alfieri (*cf. supra*).

PLATON, *Phédon*, tr. fr., in *Œuvres complètes*, Gallimard, « Bibliothèque de la Pléiade », 1950, t. 1. Le texte le plus ancien que nous ayons conservé et qui évoque explicitement la sphéricité de la Terre.

ROVELLI, C., *Che cos'è il tempo ? Che cos'è lo spazio ?*, Di Renzo, 2000. Transcription d'une longue interview dans laquelle je décris mon parcours personnel et scientifique, et où j'illustre brièvement la naissance de quelques-unes des idées qui sont ici discutées bien plus en détail.

ROVELLI, C., « Relational quantum mechanics », in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/archives/win2003/entries/roveli/>.

Synthèse, dans le style encyclopédique, de l'interprétation relationnelle de la mécanique quantique.

ROVELLI, C., *Quantum Gravity*, Cambridge University Press, 2004. Manuel technique de gravité quantique. Vivement déconseillé à qui n'a aucune notion de physique.

- ROVELLI, C., « Quantum gravity », in BUTTERFIELD, J., EARMAN, J. (éd.), *Handbook of the Philosophy of Science, Philosophy of Physics*, Elsevier/North-Holland, 2007, p. 1287-1330. Un long article adressé aux philosophes, avec une discussion détaillée sur l'état actuel de la gravité quantique, de ses problèmes ouverts et des approches diverses de la question.
- ROVELLI, C., *Anaximandre de Milet ou la naissance de la pensée scientifique*, tr. fr., Dunod, 2009. Ce livre est avant tout une reconstitution de la pensée de celui qui a été, en un certain sens, le premier et l'un des plus grands savants de l'humanité, Anaximandre, ainsi que de l'immense influence qu'il a exercée sur le développement ultérieur de la pensée scientifique. On y trouve aussi une réflexion sur la naissance et sur la nature de la pensée scientifique : ce qui la caractérise, ce qui la distingue de la pensée religieuse, quelles sont ses limites et sa force.
- SMOLIN, L., *The Life of the Cosmos*, Oxford University Press, 1997. Beau livre de vulgarisation scientifique, où Smolin illustre ses idées sur la physique et la cosmologie.
- SMOLIN, L., *Three Roads to Quantum Gravity*, Basic Books, 2002. Sur la relativité quantique et ses problèmes ouverts.
- VAN FRAASSEN, B., « Rovelli's world », *Foundations of Physics*, 2010, 40, p. 390-417. Une discussion sur la mécanique quantique relationnelle de la part d'un des grands philosophes analytiques actuels.

Index analytique

3-sphère [88-89](#), [91](#), [93](#), [96](#), [100](#)

Abdère [17](#), [21](#), [33](#), [120](#), [155](#)

Agullo, Ivan [201](#)

Alesci, Emanuele [180](#)

Alexandrie [41](#), [43](#), [238](#)

Alfieri, Vittorio [251](#), [38](#)

Almageste (Ptolémée) [41-43](#)

Anaxagore [48](#)

Anaximandre [17-19](#), [41](#), [48](#), [137](#), [177](#), [179](#), [38](#), [180](#)

Anaximène [22](#)

Andromède (galaxie d') [68](#), [71](#)

Archimède [72](#), [217-218](#), [38](#)

Arénaire (Archimède) [217-219](#)

Aristarque [41](#), [48](#), [179](#)

Aristote [24-25](#), [28](#), [32-33](#), [39-40](#), [44-47](#), [74](#), [90](#), [96](#), [123](#), [155](#), [224](#),
[238](#), [249](#), [38](#), [160](#)

Ashketar, Abhay [201](#)

Athènes [17](#), [20](#)

atome primordial [186](#)

Barrau, Aurélien [209](#)

Beethoven, Ludwig van [98](#)

Bekenstein, Jacob [230](#)

Bianchi, Eugenio [211](#)

Big Bang [8-9](#), [83](#), [89](#), [97](#), [136](#), [183](#), [186-192](#), [203](#), [208](#), [213](#), [221](#), [243](#)

Big Bounce [190-191](#), [249](#)

Bohr, Niels [106-108](#), [112-113](#), [125-126](#), [128](#), [137-139](#), [143](#), [130](#), [146](#)

Bolzano, Bernhard [38](#)

boson de Higgs : *Voir* Higgs, Peter
[118](#)

boucles [94](#), [145-148](#), [152-154](#), [157](#), [170](#), [172](#), [175](#), [178](#), [189](#), [191](#), [196](#),
[199-201](#), [208-211](#), [229](#), [249](#), [146](#), [160](#)
bouclistes et cordistes : *Voir* cordes (théorie des) [196](#)

Bracciolini, Poggio Giovanni Francesco [35](#)

Bronstein, Matvei [138](#), [140-143](#), [154](#), [146](#)

Cavalcanti, Guido [38](#)

champ

électrique [52](#), [55](#), [69-70](#), [73](#), [113](#), [138-139](#)

électromagnétique [69](#), [73](#), [75-76](#), [102](#), [105](#), [116-118](#), [138](#), [150](#), [153](#),
[157](#), [200](#)

gravitationnel [73](#), [75-76](#), [83](#), [135](#), [137](#), [139](#), [143](#), [147](#), [149-150](#), [152-154](#),
[157](#), [162](#), [164](#), [169-170](#), [177-179](#), [202](#), [209-210](#), [100](#)

magnétique [55](#), [69-70](#), [73](#)

champs quantiques [8](#), [117](#), [119](#), [133](#), [153](#), [177-178](#), [213](#), [246](#)

Cicéron [21](#), [240](#)

Cilento [26](#)

constante de Newton : *Voir* Newton, Isaac [46](#)

constante de Planck *Voir* Planck, Max 102

Copenhague 108, 125, 143, 130

Copernic, Nicolas 10, 42-44, 138, 195, 198, 242

cordes (théorie des) 196, 199, 146

bouclistes et cordistes 196-197, 199

corrélations 210, 225, 228, 231, 236, 238-239, 247

cosmologie 21, 23, 89, 135, 189, 191, 193, 251

courbure

de l'espace-temps 77, 84, 136, 157

courbure de Riemann *Voir* Riemann, Bernhard 78

Dante Alighieri 35, 37, 47, 90-91, 94, 96, 246, 100

Darwin, Charles 11, 36, 104, 238

Démocrite 21-26, 28-30, 32-33, 37, 47-48, 64, 74, 83, 120-122, 155-156, 224, 239, 245, 249-251, 38

Descartes, René 74

DeWitt, Bryce 144, 146

diagrammes de Feynman : *Voir* Feynman, Richard 173

dimensions supplémentaires 89, 199

Diogène Laërce 38, 248

Dirac, Paul 110-114, 116-118, 125, 137-138, 142, 149, 151, 154, 195, 213-214, 130

équation de Dirac 116, 155, 130

divergences 214

Dorato, Mauro 127, 130

Ecclésiaste (Livre de) 217-218

Égypte 17, 20, 41

Einstein, Albert 9, 15, 29-31, 36-37, 54, 63-73, 75-79, 83-87, 89, 93, 96-99, 102-106, 108, 110-112, 117, 124-126, 128, 133, 135-139,

143, 147, 149, 154, 161, 169, 174, 177-179, 185, 187-188, 190,
193-195, 198, 202, 207-208, 214, 216, 242-243, 250, 100, 130

électron 50, 103, 106-110, 113-118, 121-123, 125, 133, 142, 144, 152,
158, 189-191, 130

Élée 26, 38

Éléments (Euclide) 42, 64

eLISA Voir LISA 202

énergie 8, 61, 69-70, 78, 82, 84, 102-104, 108, 112, 116, 136, 139,
150, 177, 183, 189, 197, 209, 226, 230, 233-234, 58, 130, 180

entropie 227, 230, 240

équation
de Dirac Voir Dirac, Paul 130
de Hamilton-Jacobi 146
de Wheeler-DeWitt 145-148, 162

espace-temps 66, 68-70, 77-78, 80-81, 83, 85, 93, 99, 119, 133, 135,
138, 143, 161-162, 168-171, 174-175, 177, 192, 231, 247

espace de Hilbert Voir Hilbert, David 130

état statistique 240

Euclide 42, 64

Eudoxe 41

Euripide 218

expansion de l'Univers 83, 89, 187, 191

Faraday, Michael 50-52, 54-58, 73, 76, 83, 104, 107, 116-117, 137, 147-
148, 150, 58

Feynman, Richard 25, 122-123, 127, 142-143, 149, 170, 173-174, 213-
214, 38, 130
diagrammes de Feynman 173-174
graphiques de Feynman 173-174

fluctuations 31, 113, 121, 200-201, 210
quantiques et statiques 210

fonction d'onde [144](#), [130](#)

fond de rayonnement cosmique [201](#)

formes *a priori* de la connaissance [178](#)

galaxies [8](#), [97](#), [115](#), [133](#), [185-186](#), [188](#), [191](#), [200](#), [205](#), [216](#)

Galilée [35](#), [38](#), [43-46](#), [65](#), [123](#), [165-166](#), [195](#), [58](#)

Gélon [217](#)

Goodman, Nelson [124](#)

graphiques de Feynman *Voir* Feynman, Richard [173](#)

gravitation [54](#), [72](#), [137](#)

gravitons [142](#)

hamiltonien [240](#)

Hawking, Stephen [209-211](#)

Hécaté [18-19](#)

Heisenberg, Werner [108-110](#), [112](#), [122](#), [125](#), [137-139](#), [130](#), [180](#)

Higgs, Peter [118](#), [196-198](#), [130](#)
boson de Higgs [118](#), [197-198](#), [130](#)

Hilbert, David [85-86](#), [100](#)
espace de Hilbert [130](#), [180](#)

Hipparque [41](#), [45](#)

Hiroshima [70](#)

holonomie [160](#)

horizon [10](#), [207](#), [210-211](#)

Hubble, Edwin [179](#), [186-187](#)

Hulse, Russell Alan [100](#)

information [8-9](#), [25](#), [50](#), [113](#), [119-120](#), [124](#), [157](#), [183](#), [215](#), [221-231](#),
[235-239](#), [247](#), [249](#), [240](#)

Isham, Chris [143](#)

« It from bit » [229](#)

Jacobson, Ted [145](#), [147](#)

Kant, Emmanuel [49](#), [64](#), [178](#)

Landau, Lev [73](#), [138-139](#), [141](#)

Large Hadron Collider (LHC) [196](#)

Latini, Brunetto [92-93](#), [100](#)

Leavitt, Henrietta [186](#)

Lemaître, Georges [186-188](#), [193](#)

Leopardi, Giacomo [47](#)

Leucippe [18](#), [21-22](#), [28-29](#), [155](#), [38](#)

Lewandowski, Jurek [148](#)

LHC (Large Hadron Collider) [196](#)

LISA [202](#)

longueur de Planck *Voir* Planck, Max [140](#)

Lucrèce [33-37](#), [42](#), [122](#), [249-251](#), [38](#), [130](#)

Luria, Salomon [239](#), [249](#), [38](#)

Magliaro, Elena [180](#)

Maxwell, James Clerk [50-51](#), [55-57](#), [63-65](#), [69](#), [71](#), [73](#), [76](#), [78](#), [106](#), [116-118](#), [137](#), [198](#), [58](#)

mécanique classique [189](#), [227](#), [236](#)

Mésopotamie [17](#), [20](#)

Milet [15](#), [17-18](#), [20-21](#), [26](#), [40](#), [38](#)

Minnai, Emanuela [94](#)

modèle standard [117-118](#), [172-173](#), [198-199](#), [130](#)

cosmologique [198](#)

des particules élémentaires [117](#), [172](#), [198](#)

mousse de spins [171-172](#), [174](#), [176](#), [192](#), [180](#)

nébuleuses [185-186](#)

Nelson, William [201](#)

neutrinos [118](#)

Newton, Isaac [36](#), [38](#), [40](#), [45-50](#), [52-54](#), [58](#), [64-65](#), [69](#), [71-76](#), [79](#), [83](#),
[92](#), [104](#), [107](#), [113](#), [116](#), [122](#), [137](#), [167](#), [195](#), [198](#), [242-243](#), [38](#),
[58](#)

constante de Newton [46](#), [84](#), [140](#)

Niccolò Niccoli [35](#)

Numa Pompilius [48](#)

Odifreddi, Piergiorgio [249](#), [38](#)

ondes gravitationnelles [82-83](#), [135](#), [142](#), [202-203](#), [100](#)

opérateurs [146](#), [180](#)

Palomar (observatoire du mont) [186](#)

Parménide [26](#)

particules [7](#), [9](#), [25-26](#), [30](#), [36](#), [47-49](#), [54-55](#), [57-58](#), [74-75](#), [99](#), [103](#),
[105](#), [110](#), [114](#), [116-120](#), [123](#), [133](#), [135](#), [139-140](#), [153](#), [171](#), [173-](#)
[174](#), [176-177](#), [183](#), [191](#), [196-197](#), [199](#), [235](#), [243](#), [246](#), [130](#), [180](#)

supersymétriques *Voir* supersymétrie [196](#)

Penzias, Arno [97](#)

Perini, Claudio [180](#)

Pétrarque (Francesco Petrarca) [35](#), [143](#)

Phédon (Platon) [24](#), [241](#), [251](#), [38](#)

Phrinique [20](#)

Pie XII (pape) [187](#)

Planck (satellite) [9](#), [188](#), [197-198](#), [200](#)

Planck, Max [102-103](#), [106](#), [108](#), [117](#), [141](#), [144](#), [151](#)

 constante de Planck [102](#), [108](#), [121](#), [124](#), [140](#), [215](#), [130](#), [146](#)

 échelle de Planck [144](#), [189](#), [213](#), [216-217](#), [230](#)

 étoile de Planck [209](#)

 longueur de Planck [140-141](#), [151](#), [215-216](#)

Platon [9](#), [24-25](#), [33](#), [39-42](#), [48](#), [116](#), [128](#), [224](#), [241-242](#), [38](#), [160](#)

Porphyre [41](#)

principe holographique [230-231](#)

Ptolémée [41-43](#), [195](#)

Pullin, Jorge [148](#)

QCD (quantum chromo-dynamics) [173-174](#)

QED (quantum electro-dynamics) [173-174](#)

quanta [8](#), [10](#), [15](#), [61](#), [101-102](#), [104-105](#), [108](#), [117-118](#), [124](#), [127](#), [136-139](#), [142](#), [150](#), [152-153](#), [157-159](#), [161-162](#), [164](#), [168-169](#), [173-174](#), [176-177](#), [195](#), [199](#), [201](#), [210](#), [216](#), [229](#), [231](#), [235](#), [246](#)

 d'espace [15](#), [153](#), [157](#), [159](#), [164](#), [168](#), [174](#), [177](#), [199](#), [210](#), [216](#), [231](#), [235](#), [247](#)

quarks [7](#), [118](#), [173](#), [216](#)

Quintilien [35](#)

Rebond/Grand Rebond [190](#)

réseaux [8](#), [151-152](#), [156-158](#), [171](#), [173-175](#), [225](#), [236](#), [246](#)

 de spins [156-158](#), [171](#), [175](#), [209](#)

Riemann, Bernhard [77-78](#), [83](#), [93](#), [98](#), [153](#)

 courbure de Riemann [78](#), [84](#)

Rosenfeld, Léon [146](#)

Rubbia, Carlo [118](#)

Schrödinger, Erwin [130](#), [146](#)

Sénèque [21](#)

Shannon, Claude [222-223](#), [225-227](#)

Simplicius [38](#), [100](#)

singularité [179](#), [213-214](#)

Smolin, Lee [145](#), [147](#), [251](#)

Socrate [24](#), [241-242](#)

somme sur les chemins [123](#), [170](#)

Sophocle [218](#)

spectre [106-107](#), [113-114](#), [149](#), [151](#), [201](#)
du volume [149](#)

Speziale, Simone [160](#)

spins [156](#), [158](#), [171-172](#), [174-175](#), [192](#), [229](#), [180](#)

supersymétrie [198-199](#)
particules supersymétriques [9](#), [183](#), [196](#), [199](#)

sushis d'espace-temps [168-169](#)

système binaire PSR B1913+16 [100](#)

Taormina [218](#)

Taylor, Joseph [100](#)

température [165](#), [189](#), [209-210](#), [226](#), [233](#), [236](#)

temps [8-9](#), [23](#), [27-28](#), [43](#), [48-49](#), [54](#), [57](#), [61](#), [64](#), [66-67](#), [69-71](#), [79-81](#),
[83](#), [86](#), [99](#), [101](#), [124](#), [126](#), [136-137](#), [139-143](#), [145](#), [161-169](#), [176-](#)
[179](#), [183](#), [191](#), [199](#), [205](#), [207](#), [210](#), [216](#), [231-235](#), [250](#), [38](#), [100](#),
[130](#), [180](#), [240](#)
thermique [231-232](#), [234](#)

Tenaros (cap) [19](#)

Thalès [18](#)

Théodose [33](#)

trou noir [7](#), [9](#), [82-83](#), [133](#), [135-136](#), [139-140](#), [143](#), [183](#), [205-211](#), [213](#),
[221](#), [229-230](#)

univers parallèles [199](#)

Vidotto, Francesca [190](#), [209](#)

VIRGO [202](#)

Vitruve (Marcus Vitruvius Pollio) [35](#)

Weierstrass, Karl [38](#)

Wheeler, John [143-144](#), [191](#), [229](#)

Wilson, Robert [97](#), [160](#)

Zénon [26-28](#), [154](#), [38](#)
paradoxes de [26](#), [250](#), [38](#)

TABLE

Couverture

Titre

Copyright

Préambule - En marchant au bord de la mer

Première partie - Racines

Chapitre 1 - Grains

Y a-t-il une limite à la divisibilité ?

La nature des choses

Chapitre 2 - Les classiques

Isaac et la petite lune

Michael : les champs et la lumière

Deuxième partie - Le début de la révolution

Chapitre 3 - Albert

Le présent étendu

La plus belle des théories

Mathématiques ou physique ?

Le cosmos

Chapitre 4 - Les quanta

Encore Albert

Niels, Werner et Paul

Champs et particules, c'est la même chose

Quanta 1 : l'information est finie

Quanta 2 : indéterminisme

Quanta 3 : la réalité est relation

Mais comprenons-nous vraiment ?

Troisième partie - Espace quantique et temps relationnel

Chapitre 5 - L'espace-temps est quantique

Matvei

John

Les premiers pas des boucles

Chapitre 6 - Quanta d'espace

Spectres de volume et d'aire

Atomes d'espace

Réseaux de spins

Chapitre 7 - Le temps n'existe pas

Le temps n'est pas ce que nous croyons

Le poulx et le lumineux

Sushis d'espace-temps

Mousses de spins

De quoi le monde est-il fait ?

Quatrième partie - Au-delà de l'espace et du temps

Chapitre 8 - Au-delà du Big Bang

Le Maître

Cosmologie quantique

Chapitre 9 - Confirmations empiriques ?

Des signaux de la nature

Une fenêtre sur la gravité quantique

CHAPITRE 10 - La chaleur des trous noirs

Chapitre 11 - La fin de l'infini

Chapitre 12 - Information

Temps thermique

Réalité et information

Chapitre 13 - Le mystère

Bibliographie commentée

Index analytique

Du même auteur

DU MÊME AUTEUR

Anaximandre de Milet ou la Naissance de la pensée scientifique, Dunod, 2009.

Et si le temps n'existait pas ? Un peu de science subversive, Dunod, 2012, rééd. 2014.

Éditions Odile Jacob

Des idées qui font avancer les idées

Retrouvez tous nos livres disponibles en numérique
sur odilejacob.fr

Retrouvez-nous sur Facebook

Suivez-nous sur Twitter



PAR-DELÀ LE VISIBLE

LA RÉALITÉ DU MONDE PHYSIQUE ET LA GRAVITÉ QUANTIQUE

Pionnier dans l'étude de la gravité quantique, Carlo Rovelli propose dans ce livre une vaste fresque des grandes avancées de la physique.

Des atomes de Démocrite aux « atomes d'espace », de la chaleur des trous noirs aux hypothèses sur le rôle de l'information dans notre perception de la réalité, il nous guide, sans aucune équation, sur le fascinant chemin des grandes théories – physique quantique, relativité générale – qui ont changé notre vision du monde et nous ont dévoilé, par-delà le visible, une autre réalité.

Atomes, quanta et espace-temps courbe mènent le lecteur vers l'étrange image du réel suggérée par la physique d'aujourd'hui : celle d'un monde sans espace ni temps, ni énergie. Seulement un fourmillement probabiliste de quanta élémentaires qui, dans leur danse folle, dessinent l'espace, le temps, la matière et la lumière.

C'est la trame d'un nouveau regard sur la réalité qui se révèle sous la plume d'un merveilleux conteur.

CARLO ROVELLI, physicien et historien des sciences, membre senior de l'Institut universitaire de France, est l'un des pères, internationalement reconnu, de la « gravité quantique à boucles », théorie qui cherche à comprendre l'intérieur des trous noirs et les tout premiers instants de l'Univers. Il dirige le groupe de recherche en gravité quantique au Centre de physique théorique de Marseille-Luminy.